

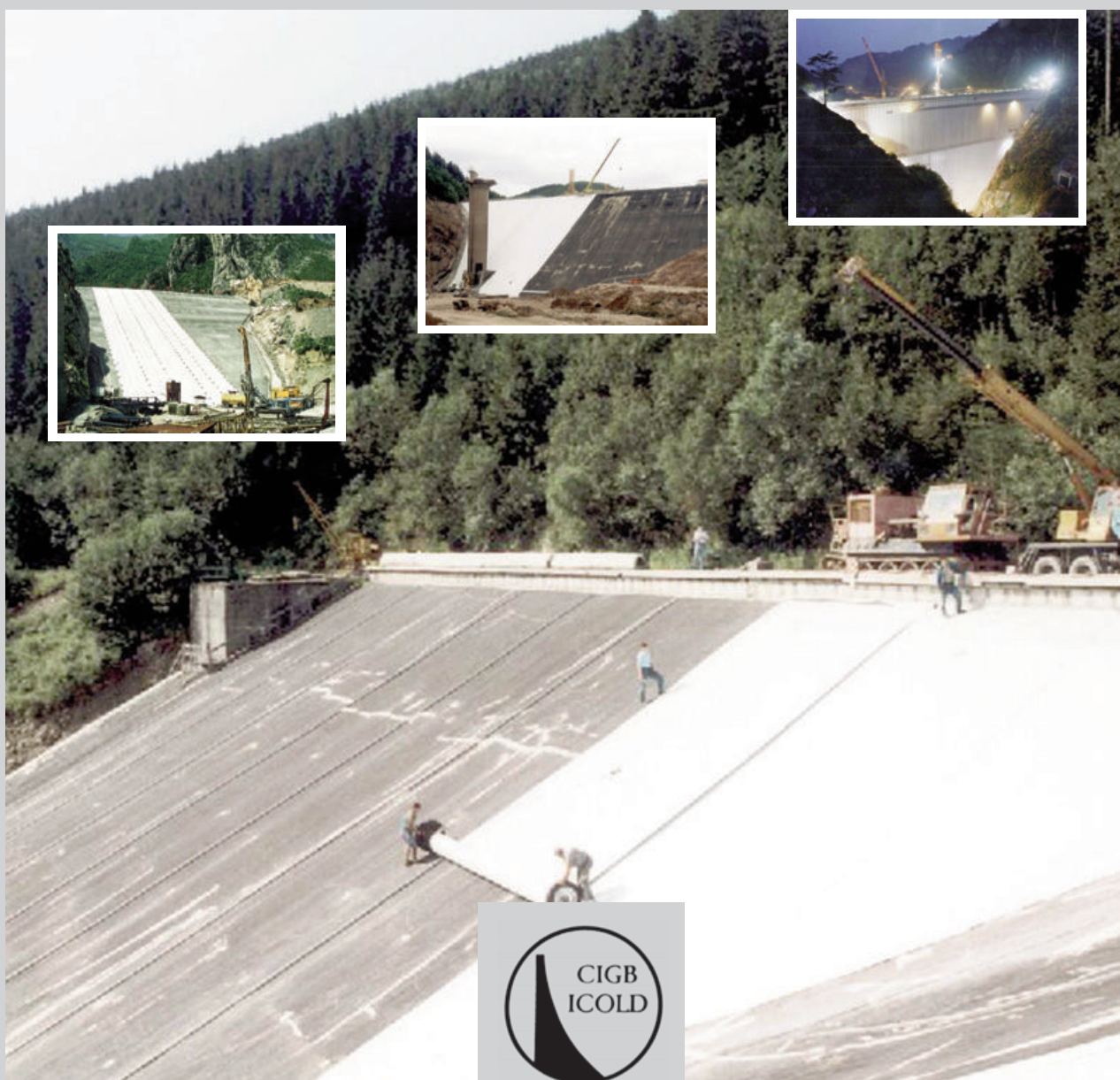
GEOMEMBRANE SEALING SYSTEMS FOR DAMS

Design principles and review of experience

DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANES POUR LES BARRAGES

Principes de conception et retour d'expérience

Bulletin 135



2010

Cover: small photos, from left to right:

- Bovilla (Albania)
- Rouchain (France)
- Miel I (Colombia)

Large photo: Moravka (Czech Republic)

Couverture : petites photos, de gauche à droite :

- *Bovilla (Albania)*
- *Rouchain (France)*
- *Miel I (Colombia)*

Grande photo : Moravka (République Tchèque)

AVERTISSEMENT – EXONÉRATION DE RESPONSABILITÉ :

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER:

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

Original text in English
Layout by Nathalie Schauner

*Texte original en anglais
Mise en page par Nathalie Schauner*

GEOMEMBRANE SEALING SYSTEMS FOR DAMS

Design principles and review of experience

DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANES POUR LES BARRAGES

*Principes de conception
et retour d'expérience*

International Commission on Large Dams - 61, avenue Kléber, 75116 Paris - France
Tél. : (33-1) 47 04 17 80 - Fax : (33-1) 53 75 18 22
E-mail : secretaire.general@icold-cigb.org
Site : <http://www.icold-cigb.net>

PREPARED BY THE EUROPEAN WORKING GROUP:

Chairman Coordinator: A. Scuero (Italian National Committee)

Secretary: G. Vaschetti (Italian National Committee)

E. Aguiár González (Balsas de Tenerife, Spain),

P. Bartek (Swiss National Committee),

M. Blanco Fernández
(Laboratorio Central De Estructuras Y Materials C.D.E.X., Spain),

P. Brezina (Povodi Odry, Czech Republic),

H. Brunold (Austrian National Committee),

D. Cazzuffi (CESI, Italy),

H. Girard (Cemagref, France),

M. Lefranc (French National Committee),

J. L. Machado do Vale (Portuguese National Committee),

C. Massaro (Azienda Energetica Metropolitana Torino),

J. Millmore (British National Committee),

L. Schewe (German National Committee),

P. Sembenelli (Italian National Committee),

With the assistance of R. M. Koerner (GSI, USA).

TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION	13
1.1. Scope	13
1.2. An overview of geosynthetics	14
1.3. Content of bulletin	16
2. MATERIALS, TESTING, AGEING	18
2.1. Materials	18
2.1.1. Polymeric geomembranes	18
2.1.1.1. <i>Classification</i>	18
2.1.1.2. <i>Composition</i>	20
2.1.1.3. <i>Configurations</i>	21
2.1.1.4. <i>Form of supply</i>	22
2.1.2. Bituminous geomembranes	23
2.1.2.1. <i>Principle and composition</i>	23
2.1.2.2. <i>Configuration</i>	23
2.1.2.3. <i>Form of supply</i>	23
2.1.3. Geomembranes composition and potable water	24
2.1.4. Seams	24
2.1.4.1. <i>Polymeric geomembranes</i>	25
2.1.4.2. <i>Bituminous geomembranes</i>	27
2.1.5. Comparative behaviour of geomembranes	28
2.1.6. Geotextiles and related products	30
2.2. Geomembrane Testing	31
2.2.1. Type of tests by tasks	31
2.2.2. Index tests and performance tests	32
2.2.3. Chemical analysis and polymer identification	32
2.2.4. Physical/mechanical properties and test methods	33
2.2.4.1. <i>Permeability to Water</i>	33
2.2.4.2. <i>Tensile behaviour: uni-axial on narrow wide strips</i> <i>(Index Test)</i>	33
2.2.4.3. <i>Tensile behaviour: axi-symmetric on large samples</i> <i>(Performance Test)</i>	34
2.2.4.4. <i>Puncture resistance (Index/performance Test)</i>	36
2.2.4.5. <i>Impact resistance (Index/performance Test)</i>	41
2.2.4.6. <i>Tear resistance (Index/performance Test)</i>	41
2.2.4.7. <i>Interface shear strength (Index/performance Test)</i>	41

2.2.4.8. <i>Testing of anchorage by embedding (Index/performance Test)</i>	41
2.2.4.9. <i>Tensile behaviour of seams (Index/performance Test)</i> ...	42
2.2.4.10. <i>Stress-Cracking (Index/performance Test)</i>	42
2.2.5. Durability and test methods	42
2.2.5.1. <i>Ultraviolet radiation (Index/performance Test)</i>	42
2.2.5.2. <i>Thermal aggression</i>	43
2.2.5.3. <i>Biological</i>	43
2.2.5.4. <i>Chemical aggression (Index / performance test)</i>	45
2.2.5.5. <i>Oxidation</i>	46
2.2.5.6. <i>Synergistic effects</i>	46
2.2.6. Specific testing for bituminous geomembranes	46
2.2.7. CEN Standard EN 13361 “Geosynthetic Barriers- Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams relevant”	47
2.3. Ageing of geomembranes. Field experience	51
2.3.1. Lifetime prediction based on field results	52
2.3.1.1. <i>Plasticised Polyvinyl Chloride (PVC)</i>	52
2.3.1.2. <i>Low Linear Density Polyethylene (LLDPE) and High Density Polyethylene (HDPE)</i>	53
2.3.1.3. <i>Elastomeric</i>	54
2.3.1.4. <i>Chlorosulphonated Polyethylene (CSPE)</i>	55
2.3.1.5. <i>Polypropylene (fPP)</i>	55
2.3.1.6. <i>Chlorinated Polyethylene (CPE)</i>	56
2.3.1.7. <i>Bituminous geomembranes</i>	56
2.3.2. The Spanish experience	57
2.3.3. Roofing experience	57
2.4. Geotextiles and related products: properties and test methods	58
2.5. Concluding remarks	58
3. LOADS APPLIED TO GEOMEMBRANE SEALING SYSTEMS (GSS)	59
3.1. Introduction	59
3.2. Mechanical loads	59
3.2.1. Gravity load	59
3.2.2. Subgrade differential deformation	59
3.2.3. Puncture load	61
3.2.4. Wind load	62
3.2.5. Reservoir waves	64
3.2.6. Ice in the reservoir	64
3.2.7. Uplift from water or air	64

3.3. Physical, chemical and biological attack	65
3.3.1. Heat	65
3.3.2. Ultra Violet radiation	66
3.3.3. Water ingredients	67
3.3.4. Biological action (micro-organisms)	67
3.3.5. Vegetation	67
3.3.6. Fauna	67
3.3.7. Vandalism	68
4. GEOMEMBRANES FOR NEW CONSTRUCTION AND REHABILITATION OF FILL DAMS	69
4.1. General	69
4.1.1. The upstream system	69
4.1.1.1. <i>Exposed geomembrane system</i>	73
4.1.1.2. <i>Covered geomembrane system</i>	74
4.1.2. The internal system	75
4.2. Loading	77
4.3. The upstream system	79
4.3.1. General	79
4.3.2. Geomembrane sealing layer	83
4.3.3. Supporting layer	84
4.3.4. Drainage layer	85
4.3.5. Transition zone	87
4.3.6. Face anchorage	87
4.3.6.1. <i>General</i>	87
4.3.6.2. <i>Mechanical anchorage</i>	87
4.3.6.3. <i>Anchorage by loading</i>	89
4.3.6.4. <i>Gluing</i>	90
4.3.6.5. <i>Ballast anchorage (covered geomembrane)</i>	90
4.3.7. Anchorage at peripheries	93
4.3.7.1. <i>Mechanical anchorage</i>	93
4.3.7.2. <i>Insert type anchorage</i>	94
4.3.7.3. <i>Ballast anchorage</i>	95
4.3.8. Anchorage around pipes and penetrations	96
4.4. The internal system	96
4.5. Placement	97
4.5.1. Supporting layer	98
4.5.2. Placement of geomembrane	101

4.6. Typical examples	103
4.6.1. New construction, covered bituminous membrane	103
4.6.2. New construction, exposed PVC geomembrane	104
4.6.3. New construction, covered PVC geomembrane	105
4.6.4. New construction, covered PVC geomembrane	106
4.6.5. Repair, exposed PVC geomembrane	107
4.6.6. Repair, covered PVC geomembrane	109
5. GEOMEMBRANES ON CONCRETE AND MASONRY DAMS	110
5.1. Range of applications	110
5.1.1. Applications in new dam construction	110
5.1.2. Applications in dam rehabilitation	111
5.2. Design principles	115
5.2.1. Partial sealing system	116
5.2.2. Exposed sealing system	117
5.2.3. Covered sealing system	117
5.3. Loads	117
5.4. Geomembrane sealing system - general concepts	118
5.4.1. Introduction	118
5.4.2. Geomembrane	118
5.4.3. Subgrade and support layer	120
5.4.4. Anti-puncturing layer	121
5.4.5. Anchorage	121
5.4.6. Drainage and ventilation system	124
5.4.6.1. <i>General</i>	124
5.4.6.2. <i>Design of the drainage system</i>	125
5.4.6.3. <i>Construction</i>	128
5.4.7. Exposed geomembrane and anchorage system	128
5.4.8. Covered geomembrane and cover layer	133
5.5. Installation techniques	134
5.5.1. In the dry	134
5.5.2. Underwater	136
5.6. Typical examples	137
5.6.1. Rehabilitation of masonry dams, exposed PVC geomembrane, dry installation	137
5.6.2. Rehabilitation of buttress dam subject to AAR, exposed PVC geomembrane, dry installation	140
5.6.3. Rehabilitation of multiple arch dam, exposed PVC geomembrane, dry installation	141

5.6.4. New elastic cut-off, LLDPE geomembrane	142
5.6.5. Rehabilitation of arch dam, exposed PVC geomembrane, underwater installation	143
6. GEOMEMBRANES FOR ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS: NEW CONSTRUCTION, REHABILITATION AND INDUCED JOINTS	144
6.1. Range of applications	145
6.1.1. Applications in construction of new dams	145
6.1.2. Application in rehabilitation of RCC dams	147
6.2. Design principles	147
6.2.1. General	147
6.2.2. The exposed sealing system	150
6.2.3. The covered sealing system	151
6.2.4. Comparison of the two systems	152
6.3. Loading	153
6.4. Geomembrane sealing system	153
6.4.1. General	153
6.4.2. Geomembrane	154
6.4.3. Support surface and lower protection of the waterproofing geomembrane	154
6.4.4. Drainage and ventilation layer	155
6.4.5. Drainage collection and discharge	155
6.4.6. Anchorage system over the dam face	156
6.4.7. Anchorage at top	157
6.4.8. Anchorage at submerged periphery	157
6.5. Installation techniques	157
6.5.1. Exposed geomembrane system	157
6.5.1.1. <i>Concurrent installation</i>	157
6.5.1.2. <i>Post-Installation</i>	159
6.5.2. Covered geomembrane system	160
6.6. Typical examples	161
6.6.1. Exposed PVC geomembrane installed after completion of dam, geonet on entire upstream face	161
6.6.2. Exposed PVC geomembrane with different thickness depending on water head, installed during construction of dam	162
6.6.3. Covered PVC geomembrane, part of prefabricated panels used as permanent formworks for construction of dam	163

7. SPECIAL CASES.....	165
7.1. General	165
7.2. System as repair of joints and cracks	165
7.2.1. General	165
7.2.2. Support	166
7.2.3. Anchorage	166
7.2.4. Sealing at periphery	167
7.2.5. Cover layer	168
7.3. System on induced contraction joints (RCC dams)	168
7.3.1. General	168
7.3.2. Design.....	169
7.3.3. Subgrade preparation	171
7.4. Type of geomembrane	171
7.5. Underwater applications	172
7.6. Typical examples	172
7.6.1. Exposed PVC geomembrane for repair of failing joints/cracks .	172
7.6.2. Exposed PVC geomembrane on contraction joints where major movements are expected	173
7.6.3. Exposed PVC geomembrane on leaking joints	174
7.6.4. Exposed PVC geomembrane on contraction joints since construction.....	175
7.6.5. Dry and underwater installation: exposed PVC geomembrane on joints and crack	175
8. CONTROL OF QUALITY OF A GEOMEMBRANE SEALING SYSTEM	178
8.1. Foreword	178
8.2. Quality control and quality assurance	178
8.3. MQC items	180
8.4. Procedures to assure survival	180
8.5. CQC items	181
8.5.1. Acceptance of materials at site	182
8.5.2. Acceptance of surface	183
8.5.3. Installation of geotextile	184
8.5.4. Installation of geomembrane sheets/panels	184
8.5.5. Installation of fastening system on upstream face	185
8.5.6. Assembling of geomembrane sheets/panels (field joints)	185
8.5.7. Watertightness of perimeter seals	187

8.5.8. Final concluding inspection of geomembrane	187
8.5.9. Placement of cover layer	189
8.5.10. <i>Final concluding inspection of geomembrane sealing system</i>	190
8.5.11. <i>Documentation</i>	190
9. GUIDANCE ON TECHNICAL CONTENT OF CONTRACTS	191
9.1. General considerations	191
9.2. Technical specifications	195
9.2.1. Materials	196
9.2.1.1. <i>Synthetic materials</i>	196
9.2.1.2. <i>Fixation materials</i>	197
9.2.1.3. <i>Drainage materials</i>	197
9.2.1.4. <i>Other materials</i>	197
9.2.2. Sealing system	198
9.2.2.1. <i>Description of constituents</i>	198
9.2.2.2. <i>Surface preparation</i>	198
9.2.2.3. <i>Joining of sheets/rolls</i>	199
9.2.2.4. <i>Perimeter seal</i>	199
9.2.2.5. <i>Drainage system</i>	199
9.2.2.6. <i>Fixation</i>	199
9.2.2.7. <i>Experience of proposed material</i>	199
9.2.2.8. <i>Experience of the proposed fastening system</i>	200
9.2.3. Ballasting layer	200
9.3. Installation plan and schedule	200
9.4. QC plan	200
9.5. Acceptance criteria of performed works	201
9.5.1. Liner	201
9.5.2. Fixations	201
9.5.3. Seams	202
9.5.4. Leakage	202
9.6. Warranty	203
9.7. Bill of quantities and conditions	203
9.8. Concluding remarks	204
9.9. Annexes	205
9.9.1. Check list	205
9.9.2. Compliance to tender requirements	209
9.9.3. Example of warranty	210

Technical solutions/geomembranes adopted in the cited examples 211

- *Appendix 1 (data base for the 290 dams in which geomembranes have been used) is available at ICOLD.*
- *Appendix 2 (list of geomembrane technology terms and definitions).*
- *Appendix 3 (the leading references on testing standards and on the use of geomembranes and their application on various dams).*

FOREWORD

The first edition of this Bulletin was issued in 1981 as Bull. 38 (*). It was a precise, detailed technical guide with comprehensive references: types of membranes along with their features were reviewed as well as theoretical and actual strains involved; procedures to be developed were detailed with examples.

In 1991, the new Bulletin 78, “Watertight Geomembranes for Dams. State of the Art” (**) cited 70 dams incorporating geomembranes and it focused on new and improved materials which in the meanwhile became available and on the experience gained which has resulted in a better understanding of their use and in advanced engineering skills in this field so that they have been used in higher dams than before. The Bulletin 78 dealt with new areas such as enhancing the water retaining performance of other facings, repairing old gravity dams and the deteriorated upstream concrete facings of fill dams. Lastly, Bulletin 78 reported new ideas regarding drainage, supporting layer and protective covering and geomembranes which were at that time (1990) under consideration for the upstream facings to roller compacted concrete dams.

This new edition in 2010 cites 280 dams and updates the data and recommendations of the first two 38 and 78 Bulletins. It reviews the new information and practices that have appeared in the meantime, which include application of geomembrane as the only watertight element in fill dams (Bovilla, Albania, 91 m, 1996), in RCC dams (Miel 1, Colombia, 188 m, 2002), as external joints on RCC dams (Porce II, Colombia, 118 m, 2000), as underwater repair of dams on gravity dams (Lost Creek, USA, 36 m, 1997) and on RCC dams (Platanovyssi, Greece, 95 m, 2002).

This new Bulletin also deals with application of geomembranes for dams affected by AAR (Pracana, Portugal, 65 m, 1992). The Bulletin reports about sealing of defective joints and cracks in the upstream face of CFRDs by strips of geomembranes mechanically fastened (Strawberry, USA, 101 m, 2002).

The 280 dams incorporating geomembranes cited in this new Bulletin are 188 fill and 91 concrete + RCC (+1 of unknown type). Out of the 280 dams 48 are in USA, 47 in China, 42 in France, 35 in Italy, 10 in Spain and in Germany, 9 in Austria, 6 in the Czech Republic, 5 in Portugal, 4 in Bulgaria and in UK, 2 in Belgium, Cyprus, Romania, Slovakia and Switzerland, 5 scattered in other

(*) *Report prepared by R. Corda and H. Grassinger, members of the Committee on Materials for Fill Dams, with the assistance of K. Rienössl (Austrian National Committee) and J. Combelles, J. Couprie, P. Huot, V. Lelu, D. Loudière and P. Paccard (French National Committee).*

(**) *Report prepared by R. Corda, member of the Committee on Materials for Fill Dams, with the assistance of G. Degoutte and C. Bernhard (CEMAGREF, France), L. O. Timblin and W. R. Morrisson (USCOLD) and D. Cazzuffi (ENEL, Italy).*

European countries. Europe and USA account for > 67% of the total (188 dams). Because of the large experience gained in Europe, this revision was prepared by the European Working Group on Geomembranes as Facing Materials for Dams, appointed by the International Commission on Large Dams, with the assistance of some experts from USA. This Bulletin conveys to the reader a real worldwide experience on use of geomembranes, with the oldest now dating more than 45 years and still in service. The authors deserve our warmest appreciation, and in particular Alberto Scuro, co-ordinator of the Group, Gabriella Vaschetti, Secretary, and some members of the Group, in alphabetical order, Blanco, Cazzuffi, Girard, Koerner, Lefranc, Millmore, Schewe, Sembenelli, Vale.

A. M. MARULANDA
Chairman,
Committee on Materials for Fill Dams

1. INTRODUCTION

1.1. SCOPE

According to IGS, the International Geosynthetics Society established in 1983, a geomembrane is “a planar, relatively impermeable, polymeric (synthetic or natural) sheet used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications”.

Geomembranes are made from relatively thin continuous polymeric sheets, but they can also be made from the impregnation of geotextiles with asphalt or elastomer sprays or as multilayered bitumen geocomposites. These sheets are prefabricated in a factory and transported to the job sites, where placement and field-seaming are performed to complete the job.

For more than 45 years geomembranes have been successfully used to provide a watertight facing on new RCC dams up to 188 m high, they have been employed for repair of old masonry and concrete dams up to 174 m high, and as impervious components on fill dams up to 198 m high. They have been installed in the dry and underwater.

Table 1
Total dams with geomembranes*

Type of dam	Number of dams	% on total
Fill	183	69.1
Concrete	47	17.7
RCC	34	12.8
Unknown	1	0.4
Total	265	100.0

*The cut line for the database which is the source of tables and figures is December 31, 2006. The full database up to publication of the Bulletin is available from ICOLD.

Based on the successful experience gained and on the expected expansion in the future of use of geomembranes in dams, this Bulletin will focus on factory-made continuous polymeric and bituminous sheet geomembranes and their application in dam construction. The following information and guidelines aim to give a thorough understanding of the characteristics and potential advantages of a geomembrane facing, to achieve a solution that is adequately specified, designed, constructed and controlled.

The synthetic product “Geomembrane” is part of the “Geomembrane Sealing System”, abbreviated as GSS, a system of superposed layers necessary for the construction, placement and the preservation of the sealing of a structure or, in accordance with the aim of this Bulletin, a dam. A geomembrane sealing system is generally a composition of more than one layer of geosynthetic material or natural material, which provides protection, strengthening or downstream drainage.

Therefore, the design of a geomembrane sealing system implies the global study of the composed sealing system and is not limited to the geomembrane.

Most of the present recommendations of course also apply to dams less than 15 m high, to linings for embankments, canals, hydraulic tunnels, ponds and reservoirs of all kinds.

1.2. AN OVERVIEW OF GEOSYNTHETICS

All soil-, rock-, and groundwater-related activities fall within the general scope of the various applications of geosynthetics. Geo, of course, refers to the earth. Therefore, the term geosynthetics seems to be appropriate in the combination with *synthetics*, since the materials used are almost exclusively from human-made products.

With synthetics an exciting new chapter in engineered construction materials has emerged for the civil engineering community -and the rapidity with which the related products are being developed and used is nothing short of amazing. The reasons for this explosion of geosynthetics are numerous and include the following:

- They are quality controlled manufactured in a factory environment with constant parameters,
- They generally replace short or missing natural material resources,
- They generally replace natural construction materials in designs which are difficult if using natural materials,
- They have made previously impossible designs and applications possible,
- Their use is required by regulations in some environmental protective cases,
- They are (generally) cost competitive against natural soil materials and concrete that they replace,
- They can be installed rapidly,
- As of December 2009, they have a 50 years performance history (first application in 1959) that makes engineers increasingly inclined to use them,
- They are being actively marketed and are widely available,
- They can easily be transported over great distances at relatively low costs.

The use of geosynthetics instead of natural (soil) or man-made materials (concrete, steel) has basically the objectives:

- To replace natural material where either short in availability or missing or of inadequate quality,
- To provide better structural quality (e.g., without deterioration of material or water tightness),
- To do the job more economically (either through lower initial cost or/and through greater durability and longer life, thus reducing maintenance costs).

The family of geosynthetics which are commonly used in dams are grouped in accordance with their characteristics and field of application.

Diagram for geosynthetics and their application
Geosynthetics (GSY)
 (definition includes both synthetic and natural polymeric materials)

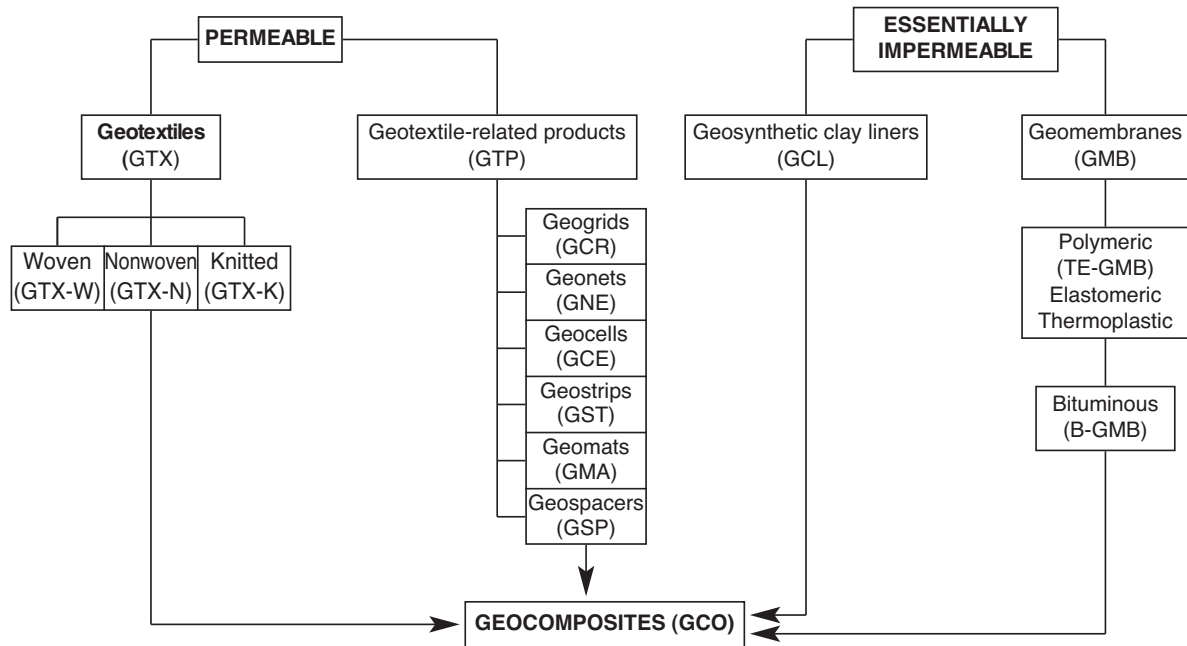


Fig. 1
 Diagram for geosynthetics and their application

Table 2
 Geocomposites (GCO): Some examples by function

Separation	Filtration	Drainage	Reinforcement	Protection	Barrier	Surface erosion control
GTX + yarns	GTX + GTX	GSP + GTX (+ GBR*-P)	GTX + GTX	GTX + GTX	GMB + GTX	GTX + GCE
GTX + GTX	GTX + GMA	GTN + GTX (+ GBR-P)	GTX + GGR	GTX + soil	GTX + soil (bentonite)	GGR+ GMA
etc.	etc.	etc.	etc.	GMA + soil	GBR-P + soil (bentonite)	GTX + seeds
				GTX + GMA	GTN + soil	etc.
				GTX + GGR	etc.	
				etc.		

NOTE: All geosynthetics may have multiple functions.

*GBR: Geosynthetics Barriers.

Because of their open fabric, the main application of geotextiles, geonets, geospacers and geogrids is the separation, drainage, filtration and reinforcement of soils in earthworks such as fill dams. They are also used in combination with geomembranes mainly as protective layers.

A geocomposite is a combination of at least two geosynthetics: geotextile and geonet, geotextile and geomembrane, or any other combination of these materials with other materials (e.g., deformed plastic sheets, steel cables, or steel anchors). This is the most creative area of geosynthetics, and application areas are numerous, covering all functions previously discussed.

A major topic area of polymeric and bituminous geomembranes is that of providing a leak-proof low permeability barrier for sealing purpose in order to prevent liquid movement from one point to another. Geomembranes retain their watertight properties even under service strains and are connected by strong and durable bonding. Another category of impermeable barrier are the geosynthetic clay liners (GCL): a mainly bentonite layer in between two geotextile layers for stabilisation. GCL do not provide strong permanent bonding of the layers and they have never been used in dams and they are not considered in this Bulletin.

Consistent with current engineering practice, the term “geomembrane” is used here mainly for polymeric geomembranes and for bituminous geomembranes. Geomembranes are made from relatively thin factory-made continuous sheets, but can also be made on site from the impregnation of geotextiles with bitumen or elastomers. Polymeric geomembranes have been used in 240 dams of which 9 geomembranes are made by in situ impregnation, bituminous geomembranes in 23 dams of which 3 geomembranes are made by in situ impregnation. Last application of in-situ bitumen impregnated geotextile was in 1988 at Humenize (CZ). In general this technology did not provide satisfactory behaviour and these days it is disregarded.

In 1990, the ICOLD Bulletin 78 made a short reference to in-situ geomembranes, impregnated geotextiles and sprayed liners based on polyurethane and polypropylene resins, which are produced on site instead of being factory manufactured. This type of product relies on constant thickness and perfect bonding to the support, which entails extensive surface preparation. Its application requires weather conditions which are difficult to obtain constantly on a job site. This is one of the reasons of the failures incurred by this type of membrane. Since they are close to the family of the resins as a coating layer and their use is less and less frequent, this type of membrane is not subject of this Bulletin.

1.3. CONTENT OF BULLETIN

The Bulletin is divided in the following chapters:

Chapter 1 provides an introduction to geosynthetics and to their classification in several distinct families and in general their field of application. It provides the content and scope of this Bulletin.

Chapter 2 describes the classification and characteristics of geomembranes; it further discusses materials specifications and testing.

Chapter 3 describes the loads and stresses to which geomembranes are exposed, criteria and recommendations for design, construction and operation.

Chapter 4 deals with the application of geomembranes as the sealing element in construction of new fill dams. The chapter also illustrates application of geomembranes to repair of asphalt-concrete sealing facings, bituminous geomembrane facings, and concrete facing in CFRD.

Chapter 5 provides the application of geomembranes to repair of concrete, shotcrete and masonry facings of gravity and arch dams. The chapter addresses repair in the dry and underwater.

Chapter 6 deals with the application of geomembranes to RCC dams as a watertight upstream facing in new construction, and as a repair on existing RCC dams.

Chapter 7 deals with special applications: as a watertight element at joints and cracks and as an underwater repair measure.

Chapter 8 deals with QCA.

Chapter 9 gives recommendations for specification for design, supply and construction of geomembrane sealing systems.

Appendix 1 contains a data base for the 250 dams in which geomembranes have been used.

The cut line for the statistics of the database is December 31, 2006. This appendix, and the updated database, are available from ICOLD.

Appendix 2 contains a list of geomembrane technology terms and definitions.

Appendix 3 contains the leading references on testing standards and on the use of geomembranes and their application on various dams.

As many information given are common to different types of dams, in order to keep the size of the Bulletin reasonable, they have been listed only one time and not repeated. Therefore the various Chapters of this Bulletin cannot be used as a self standing document but shall be read in conjunction with all the other parts.

2. MATERIALS, TESTING, AGEING

2.1. MATERIALS

The geomembranes reported in this Bulletin (more than 260 dams) are made from synthetic polymers (more than 91%) and from bitumen (more than 8%). This section aims to afford (a) an appreciation of the wealth of information that is available (b) basic understanding of geomembranes, and (c) the tests that are available to assess the characteristics and behaviour of geomembranes.

2.1.1. Polymeric geomembranes

This section refers to polymeric geomembranes only, which have been used in 240 dams.

Polymeric geomembranes consist of one or more layers of polymeric materials, manufactured in a plant by one of the three processes: calendering, extrusion, and spread coating.

2.1.1.1. Classification

A polymeric material consists of many units (monomers) linked together. A monomer is the molecular compound used to produce the polymer. Different type and lengths of the polymeric chain result in materials with different characteristics.

The most common polymers used as base products in the manufacture of geomembranes can be classified in three types:

I. – Thermoplastics: they can be repeatedly heated to their softening point, shaped or worked as desired, and then cooled to preserve that remoulded shape.

Table 3
Synthetic materials more frequently employed as geomembranes

Type	Basic Material	Abbreviation
Thermoplastic	Chlorinated polyethylene Ethylene-vinyl acetate copolymer Polyethylene Polypropylene Polyvinyl chloride	CPE EVA/C PE* PP PVC
Thermoplastic rubbers	Chlorosulfonated polyethylene Ethylene-propylene copolymer	CSPE E/P
Thermoset	Polyisobutylene Chloroprene rubber Ethylene-propylene diene monomer Butyl rubber Nitrile rubber	PIB CR EPDM IIR NBR

*Within the group shown, polyethylene and polypropylene are collectively called polyolefins.

II. – Thermoplastic rubbers: transitional (blended) materials which can be heat seamed initially but cross-link as they age, becoming thermoset and therefore need to be patched with adhesives if holes occur.

III. – Thermo-sets: the heating process cannot be repeated. Any additional heat after first forming will only lead to charring and degradation of the material.

Depending on the density, PE can be stiffer (High Density PE, abbreviated in HDPE) or softer at various degrees (now classified under one group as Linear Low Density PE, abbreviated in LLDPE).

The following table lists the various types of geomembranes as they have been installed in dams. Bituminous geomembranes, and in situ membranes, have been included for a comprehensive overview.

Table 4
Geomembranes in dams

GM type	Basic material	Abbreviation	Total dams				%
			Exposed	Covered	Unknown	TOTAL	
Polymeric	Polyvinylchloride - Plasticised	PVC-P	80	73	3	156	59.32
Polymeric	Polyolefin	LLDPE*	0	29	1	30	11.41
Polymeric	Polyolefin	HDPE	3	12	1	16	6.08
Polymeric	Butyl rubber, polyisobutylene, ethylene-propylene-diene monomer	IIR, PIB, EPDM	5	4	2	11	4.18
Polymeric	Chlorosulfonated polyethylene	CSPE	3	5	1	9	3.42
Polymeric	Geotextiles impregnated with polymers	In situ membrane	2	7	0	9	3.42
Polymeric	Polyolefin	PP	3	3	0	6	2.28
Polymeric	Chlorinated polyethylene	CPE	0	3	0	3	1.14
Bituminous	Oxidized bitumen	Prefabricated GM	7	10	0	17	6.47
Bituminous	Polymeric bitumen	Polymeric bitumen	0	3	0	3	1.14
Bituminous	Oxidised bitumen	In situ membrane	3	0	0	3	1.14
Sub-total polymeric						240	91.25
Sub-total bituminous						23	8.75
Total known						263	100,0

*LLDPE includes all types of flexible PE geomembranes that have lower density than HDPE.

Crystallinity is significant, and in some instances critical, in the behaviour of polymeric geosynthetics. It can be shown that increasing crystallinity results in the following:

Table 5
Effects of increasing crystallinity

Increasing crystallinity increases	Increasing crystallinity decreases
Stiffness or hardness	Vapour transmission
Heat resistance	Elongation or strain at failure
Tensile strength	Flexibility
Modulus	Impact strength
Chemical resistance	Stress crack resistance (HDPE only)

The amount of crystallinity gives rise to a further polymer classification that is not in the remit of this bulletin. Just as a matter of information, geomembranes with lower crystallinity like PVC and EIA (Ethylene Interpolymer Alloy) become soft and pliable when heated without any substantial change in inherent properties, and when cooled revert back to their original properties, so that they are easily seamed by heat, extrusion or chemical methods. PVC is more precisely referred to as PVC-P (plasticised). For the purpose of this Bulletin both names are acceptable.

Geomembranes with higher crystallinity like PE and PP (more precisely referred to as fPP, flexible PP), are more difficult to seam.

2.1.1.2. Composition

No geosynthetic material consists of 100% polymer resin. In all cases, the primary resin is mixed with additives, fillers, extruders and/or other agents for a variety of purposes. The total amount of polymer resin in a given formulation varies widely; from a minimum of 50% to as much as 97%.

Common additives include the following:

- *Carbon black* used as stabiliser against the UV radiations, much used in the case of polyolefins, fundamentally in polyethylene (PE) where it is incorporated in the resin in a proportion between 2 and 3%. A deterioration of PE has been detected in areas of strong solar radiation; deterioration being higher as the thickness of the sheet reduces. Higher thickness also avoids problems in the proximity of welds, tears, losses of mechanical properties, and punctures.
- *Plasticisers* used notably in the manufacturing of PVC to impart flexibility. The loss of these plasticisers for extraction or, fundamentally, for migration, causes a progressive degradation of the geomembrane by solar radiation, or by the presence of water, depending on the nature of the plasticisers. The thickness is important also in this respect.
- *Ultraviolet (UV) light absorbers* play an important part in the formulation of these materials, because without them the aging processes would be extremely quick. The degradation is marked by colour change.

- *Antioxidants* are of two types with different purposes: high temperature protection during the extrusion process and low temperature protection against polymer degradation. Until the AOs are depleted there can be no polymer ageing, thus they are critically important.
- *Other additives* such as pigments or colorants, flame retardants, biocides, foaming agents, lubricants, fillers, thermal stabilizers and antistatic agents, are in general added to the resin.

At the present time, different salts of heavy materials formerly used as additives are being substituted by other products without negative consequences on the environment.

2.1.1.3. Configurations

Polymeric geomembranes employed in the waterproofing of dams are usually presented in four different ways (Fig. 2):

- *Geomembranes without reinforcement or homogeneous*, constituted, exclusively, of the polymeric material and the corresponding additives.
- *Multi-layered geomembranes*, formed as their name indicates of a series of layers, of the same material or of different materials. This procedure is more typically used to reduce costs of the geomembranes or to improve some of the properties. For instance the external layer usually having a higher quantity of additives for ultraviolet protection, enhances ultraviolet protection. On the other hand, damage to the external layer may expose deeper layers more susceptible to UV. A single layered geomembrane with higher thickness may be preferred in this respect.
- *Geomembranes with scrim reinforcement*, when the polymeric material has inserts of polymeric material such as glass fibres, synthetic threads, fundamentally polyester threads, veils or fabrics. The objective of the synthetic fibres is to improve the mechanical properties; all fibres can significantly increase the dimensional stability of the geomembrane. Depending on the type of reinforcement used, a certain property for a particular use can be improved, the most common type being a PET scrim.
- *Geomembranes with backing reinforcement*, when the geomembrane is backed with fabrics, or other reinforcements. A backing geotextile can:
 - Impart stability to the compound during the manufacturing process
 - Increase geomembrane tensile, tear, burst and puncture strength and modulus
 - Confer or increase dimensional stability to geomembranes that would otherwise shrink or expand as a result of temperature changes.

The most commonly used reinforcements are made of polyester, polypropylene, polyamides, glass. Geomembranes with fabric reinforcement exhibit reduced strain at failure.

Furthermore a geotextile used in combination with a geomembrane as a backing layer on one or both sides also provides the following additional benefits:

- Acts as a drainage media, since its in-plane transmissivity feature can conduct water or gases away from direct contact with the geomembrane
- Increases friction against sliding
- Improves the stress distribution underneath the geomembrane, protecting it from mechanical damages (e. g. puncturing from the subgrade).



Fig. 2
Configurations of polymeric geomembranes

Details of the manufacturing process of geomembranes are not in the scope of this bulletin and can be found in the related literature.

Geomembranes by definition and normal production methods have plane smooth faces. In many applications, it is beneficial to have a higher friction coefficient on one or both sides of the geomembrane. The increased friction can be obtained by laminating a geotextile to the geomembrane (backed geomembrane, called “geocomposite”), or by creating a textured surface on the normally smooth sheet. This second process is called “texturing”.

2.1.1.4. Form of supply

The thickness of un-backed polymeric geomembranes is between 1.0 and 4.0 mm, mass varies depending on the composition and mass per unit area from 0.9 to 4.5 kg/m².

Geomembranes are manufactured in sheets, with controlled thickness and uniformity, the available standard width are between 2 and 6 m (up to 11 m for HDPE, LLDPE and fPP). Sheets are generally up to a length that allows covering the length of the upstream face of the dam from crest to heel minimising transversal seaming. Geomembranes are generally supplied rolled or accordion-folded. The application of the geomembrane on the support will be carried out by unrolling the sheet and seaming the adjacent sheets in the appropriate way depending on the material employed.

Soft materials (as PVC-P) may also be supplied in prefabricated panels to provide a large unit surface, by seaming sheets together in a fabrication plant or on site. Most commonly the standard sheets are welded together to form panels of 4 to 6 m width.

If larger width of geomembrane rolls reduces the total number of seams, the resulting weight and size may create serious difficulty when unrolling on the upstream face of the dam, with high probability of creating detrimental folds and wrinkles.

2.1.2. Bituminous geomembranes

This section refers to bituminous geomembranes (20 dams, corresponding to less than 8% of total dams) and in situ bitumen impregnated membranes (3 cases). Bituminous geomembranes are mainly used in fill dams in France.

2.1.2.1. Principle and composition

Bituminous geomembranes are produced in a plant by impregnating and coating a non-woven needle-punched geotextile with a bituminous material in hot and fluid mass; the geotextile provides both support for manufacturing and reinforcement. The geomembrane can also have grid glass reinforcement.

Two types of modified bitumen are more frequently used:

- Oxidised bitumen;
- Bitumen that has been modified by addition of polymers (usually Styrene butadiene styrene, SBS). These materials have behaviour that is similar to that of the polymers incorporated into them (visco-elasticity, in particular). Mineral fines are added as filler.

2.1.2.2. Configuration

Bituminous geomembranes used in dams also have a glass fibre mat as secondary reinforcement; one side is covered by a film to prevent root penetration, the other side has a fine coat of sand; the side with the film has a seam band protected by a strip of paper that can easily be removed before welding the rolls.

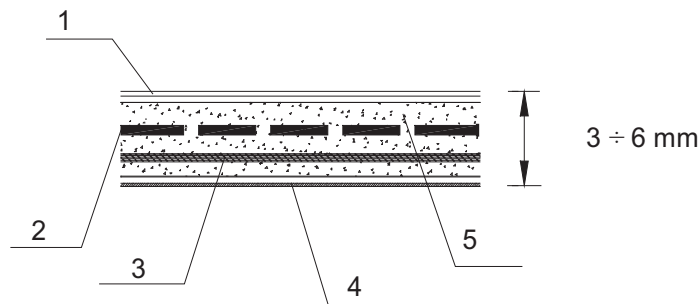


Fig. 3

Configuration of a bituminous geomembrane

1. Sanded face
2. Non-woven needle-punched geotextile, impregnated and coated with bitumen
3. Possible glass fibre
4. Anti-root film
5. Bituminous material

2.1.2.3. Form of supply

The thickness is between 3.0 and 6.0 mm and the mass between 5 to 8 kg/m². Sheets can be manufactured with a smooth or textured finishing. The available width is between 2 and 5.5 m.

2.1.3. Geomembranes composition and potable water

Even if common, it is incorrect to define “potable” the water stored in a reservoir. Water stored in dam reservoirs is exposed to the environment and to the relevant effects of birds, fauna, flora, formation of algae, contamination by acid rain, sediments in the basin, run off water, etc. Therefore, water in a reservoir cannot be considered potable, as it always needs further treatment downstream, before being distributed in the water supply system and used for human consumption.

Most geomembranes contain additives, which are indispensable to provide some basic functions such as flexibility, thermal stability, UV resistance, durability, etc. Most of these ingredients are acceptable for contact with treated drinking potable water (such as the pure treated water which may be sold in plastic bottles), some are not, such as some biocides or some UV light absorbers. A requirement for the use of geomembranes, even if the water stored in the reservoir is still to be treated, may lead to exclude from the formulation some of those ingredients which affect the overall quality and performance of the geomembrane. Generally speaking, geomembranes used in dams for water supply shall not contain ingredients such as heavy metals that may affect human health. The percentage of ingredients which may leach out from the composition of the geomembrane shall be evaluated in terms of surface of geomembrane on the dam face vs. volume of water stored in the reservoir, time of retention and type of treatment which the water will undergo downstream.

The influence of a geomembrane lining the upstream face of a dam creating a reservoir of some 100 000 000 m³ of raw water is minuscule in comparison to that of a plastic bottle containing treated drinking water. The understanding of the problem may be of significant importance in consideration of widening the list of geomembranes which can be safely allowed.

The same requirements for suitability of the ingredients apply also to covered geomembranes, as the cover layer does not isolate the geomembrane from contact with the stored water. They apply also to geosynthetics placed above the geomembrane.

In conclusion there should be a clear understanding that a geomembrane suitable for use in a dam where the reservoir contains water which will be treated downstream for human consumption or irrigation has different properties (UV resistance, durability, etc) from those of a geomembrane used to line an underground reservoir which stores treated drinking water.

Water in reservoirs where several polymeric geomembranes which are suitable for external exposure have been installed on the face of dams, after normal treatment in purification plants, has passed all tests and met all standards, indicating that the geomembrane did not affect the quality of the water.

2.1.4. Seams

The seaming of geomembrane rolls or panels is a critical aspect of their successful functioning as a barrier to liquid. Depending on the type of anchorage of the geomembrane, the seams can be affected by mechanic loads. In this case it is important to check them for traction and shear.

The joining of sheets, to achieve the continuity of the waterproofed structure, can be carried out with different methods which will depend on the class and nature of the material. The fundamental mechanism of seaming polymeric geomembrane sheets together is to temporarily reorganize the polymer structure (by melting with heat or softening with chemicals) of the two opposing surfaces to be joined in a controlled manner that results in the two sheets being bonded together. These processes may involve the addition of extra polymer in the bonded area (extruded seam).

The methods of seaming the most common geomembranes are given in Table 6 and shown schematically in Fig. 4.

a) Extrusion seams - <i>Soudage par extrusion</i>			
b) Thermal fusion seams - <i>Soudage par fusion thermique</i>			
Hot air - <i>Air chaud</i>		Hot wedge - <i>Lame chaude</i>	
Dual - <i>Double</i> 	Single - <i>Simple</i> 	Dual - <i>Double</i> 	Single - <i>Simple</i>
c) Chemical seams - <i>Soudage chimique</i>			
Chemical fusion - <i>Fusion chimique</i>		Bodied chemical fusion - <i>Fusion chimique base matière-mère</i>	
d) Adhesive seams - <i>Soudage par adhésif</i>			
Chemical adhesive - <i>Adhésif chimique</i>		Contact adhesive - <i>Adhésif par contact</i>	

Fig. 4
Seaming Methods

Ideally, seaming two geomembrane sheets should result in no net loss of watertightness and tensile strength across the two sheets, and the joined sheets should perform as one single geomembrane sheet. The characteristics of the seamed area are a function of the type of geomembrane and the seaming technique used. Various factors, such as residual strength, geomembrane type and seaming method, should be recognised by the designer when applying appropriate design factors of safety for the overall geomembrane function and performance.

2.1.4.1. Polymeric geomembranes

Thermal fusion welding is the most common seaming method for all the thermoplastic geomembranes. There are two thermal fusion or melt-bonding methods, the *hot wedge* method and the hot air method. In both of them, the surface

portions of the opposing surfaces are fully melted. The hot wedge method consists of an electrically heated resistance element in the shape of a wedge that travels between the two sheets to be seamed. As it melts the surface of the two sheets being seamed, roller pressure is applied. Hot wedge units are automated as far as temperature, amount of pressure applied and travel rate. A standard hot wedge creates a single uniform width seam, while a dual (or “split”) hot wedge forms two parallel seams with a uniform unbonded space between them, usually called *channel*. This space can be used to evaluate seam quality and continuity of the seam by pressurizing the unbonded space with air and monitoring any drop in pressure that, after accounting for drop of pressure due to the deformation of the geomembrane and therefore an increase of the free volume of the channel, may signify a leak in the seam. Typical width of seams is 2×15 mm of bonded area and 10 mm air channel.

The *hot air* method makes use of a device consisting of a resistance heater, a blower, and temperature controls to force hot air between the two sheets to melt the opposing surfaces. Immediately following the melting of the surfaces, roller pressure is applied. As with the hot wedge method, both single and dual seams can be produced and tested. Typical width of single seam is 1×30 mm. In selected situations, this technique will be used to temporarily “tack” weld two sheets together until the final seam or weld is made and accepted.

Fig. 5 to 8 illustrate testing of single and double thermal fusion seams.



Fig. 5 to 8

Testing of a single track weld with ASTM standards (mechanical point stressing, vacuum box, air lance), and of a double track weld with pressurised air (GRI GM 6 standard)

PVC, PP, HDPE, LLDPE are seamed with thermal fusion.

Extrusion welding is presently used exclusively on HDPE, LLDPE and fPP geomembranes. A ribbon of molten polymer is extruded over the edge of, or in between, the two slightly textured surfaces to be joined. The molten extrudate causes the surfaces of the sheets to become hot and melt, after which the entire mass cools and bonds together. The technique is called *extrusion fillet* seaming or *extrusion flat* seaming depending on the position of the extrudate. Extrusion fillet seaming is essentially the only method for seaming PE geomembrane patches. Temperature and seaming rate both play important roles in obtaining an acceptable bond; too much melting weakens the geomembrane and too little melting results in inadequate extrudate flow across the seam interface and in poor seam strength. Extrusion flat welding is rarely used now that hot wedge welding has been perfected.

Adhesives are bonding agents applied to both mating surfaces. After reaching the proper degree of tackiness, the two sheets are placed on top of one another, followed by roller pressure. This bonding system applies to thermo-set materials such as EPDM.

Chemical fusion makes use of a liquid solvent (typically MEK, methyl ethyl ketone) applied between the two geomembrane sheets to be joined. Following a prewash this viscous liquid is applied between the two opposing surfaces to be bonded. After a few seconds to soften the surfaces, pressure is applied to make complete contact and bond the sheets together. Excessive solvent will weaken the adjoining sheets, and inadequate solvent will result in a weak seam. The union should always be made following the manufacturer's recommendations or following the requirements of the material if a corresponding standard exists. This method is used for field seaming of CSPE.

Table 6
Possible field-seaming methods for various geomembrane types*

Seaming Method	Polymeric						Bitum.
	PVC	LLDPE	HDPE	PP	Elastomeric	CSPE	
Thermal Fusion (hot wedge and hot air)	A	A	A	A	A	A	A
Extrusion (fillet and flat)	N/A	A	A	A	N/A	N/A	N/A
Adhesive	A	N/A	N/A	N/A	A	A	A
Chemical Fusion	A	N/A	N/A	N/A	N/A	A	N/A

*A = method applicable; N/A = method not applicable.

2.1.4.2. Bituminous geomembranes

Joining of adjacent sheets is made by single track welding for a width between 12 to 20 cm.

The side with the film of the bituminous geomembranes has a seam band protected by a strip of paper that is removed to join the strips together. The strips

are joined together by welding with a propane blow torch which allows the fusion of the surfaces of the 2 strips to be welded. Pressure must then be exerted on the assembly to guarantee the correct result. Welds of bituminous geomembranes are watertight but can sometimes not provide enough strength to tear and pull. As there is a risk of creep at the seams, welding is not permitted perpendicular to the slope, a fact that generally requires the preparation of specific strips for the site in question and can imply rolls that are longer than usual.

As with all geomembranes, the assembly must not be carried out in unsuitable weather conditions, such as rain, strong winds, snow or excessively high (above 35° C) or low (below 5° C) temperatures.

2.1.5. Comparative behaviour of geomembranes

The properties of the geomembrane, the most important element of the geomembrane sealing system, must be selected to resist all the possible loads during installation and operation and to guarantee its sealing function for a period of several decades.

Although there are no fixed rules about the required durability of geomembrane in dams, a covered geomembrane shall have a projected life much longer than an exposed geomembrane. It seems reasonable that a geomembrane covered by a permanent layer of concrete should last at least 200 years. Scientific studies predict a life for a buried geomembrane of the most commonly available types (PVC, PE) in excess of 950 years.

Some exposed PVC geomembranes in dams currently are approaching 30 years service with no replacement required. It is expected that for PVC geomembranes produced now, with better understanding of the problems, improved quality of the ingredients, more sophisticated plant and quality control, increased thickness, the life should easily exceed 100 years. In Germany, sometimes the requirement for durability of exposed geomembranes in dams is 40 years. The shorter lifetime required for an exposed geomembrane is justified by the fact that being exposed it can be easily accessed and replaced. Furthermore, cost of replacement of an exposed geomembrane is generally several times less than the cost of a cover layer.

The following Table 7 gives a comparison of notable characteristics of some polymeric and bituminous geomembranes. fPP has been included, despite the few reported cases, as representative of the material of most recent application to waterproofing of dams.

Table 7
Comparative behaviour of geomembranes

ISSUE	Polymeric geomembranes					Bituminous geomembranes
	PVC-P	LLDPE	HDPE	fPP	EPDM	
Joining of sheets						
<ul style="list-style-type: none"> Normal method of joining 	Thermal seaming <ul style="list-style-type: none"> Automatic, hot air and hot wedge Manual, hot air, solvent, bodied solvent 	Thermal seaming <ul style="list-style-type: none"> Automatic, hot wedge, hot air possible Manual, extrusion 	Thermal seaming <ul style="list-style-type: none"> Automatic, hot wedge, hot air possible Manual, extrusion 	Thermal seaming <ul style="list-style-type: none"> Automatic, hot wedge Manual, hot air (extrusion possible) 	<ul style="list-style-type: none"> In factory: vulcanisation or "tape" On site: gluing or "tape" 	Thermal seaming propane flame (partial fusion)
<ul style="list-style-type: none"> Time needed before applying mechanical stress 	Almost immediate; for solvent, 3-8 days	Almost immediate	Almost immediate	Almost immediate	Several days of drying	Some cooling (one to a few hours)
<ul style="list-style-type: none"> Possible double seam for control of continuity with pressurised air (or water) 	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
<ul style="list-style-type: none"> Evaluation of seams (new products) 	Very good	Good	Good	Good	Medium	Very good
<ul style="list-style-type: none"> Repairability (seaming of ageing products) 	Good	Good	Good	Good	Medium	Easy to medium, depending on extent of ageing
Mechanical behaviour of geomembrane						
<ul style="list-style-type: none"> Under constant traction stress Under imposed deformation caused by traction 	No creep	Mainly for HDPE, for a stress higher than the yield point, significant partially irreversible deformations (creep) occur after the stress has ceased			<ul style="list-style-type: none"> Elongation fairly constant, function of the stress (no creep) 	<ul style="list-style-type: none"> No creep at parent sheet with reinforcement Possible creep near the seams (no continuity of reinforcement)
	Variable stress relaxation, depending on the material and on the entity of the stress				<ul style="list-style-type: none"> Little stress relaxation 	<ul style="list-style-type: none"> At parent sheet good relaxation of binder At seams: very good stress relief
<ul style="list-style-type: none"> Under shear (in the geomembrane or in the joints) 	Very good					<ul style="list-style-type: none"> Good (moderate at high temperature for the joints)
Flexibility at low (0°C) temperature; ease of placement at corners	Good	Medium	Poor	Medium	Excellent	Medium to good
Ease of connections on structures:						
<ul style="list-style-type: none"> In hydraulic concrete 	Good (metal profile and seam on plastic profiles)	Fairly good (metal profiles and seams on plastic profiles)			Good (metal profile and gluing to support possible)	Good easy seam at support, reinforcement by metal profile

Table 7 (continued)

ISSUE	Polymeric geomembranes					Bituminous geomembranes
	PVC-P	LLDPE	HDPE	fPP	EPDM	
• In bituminous concrete	Good	To be verified				Very good
Physical behaviour at high (30°C ambient) temperatures without protection – Deformations – Softening (that can cause tear or puncturing)						
• At placement	Medium to good depending on presence of backing geotextile	Poor (folds)	Poor (folds)	Medium (difficult automatic seaming)	Very good	Good
• In service	Good to excellent if with tensioning fastening	Good	Medium	Good	Good	Good : possible softening of material
Durability						
Environmental ageing for non reinforced geomembrane	Very good to poor depending on plasticisers	To be verified	Good	Good (to be confirmed)	Good (to be confirmed)	Poor to good (depending on products)
Behaviour in salted, acid and basic diluted water	Very good					
Susceptibility to freeze/thaw	Good					Poor
Susceptibility to climatic conditions during installation	Good (materials can be humid but the joining zone must be dry)				Significant (materials must be clean and dry)	Medium (but the joining zone must be dry)
Watertightness (geomembrane and seams)	Very good					
Friction coefficient	Medium to high **	Medium to high**	Low to high**	A priori medium, but not well know	Medium	Medium to good*

* Depending on the physical nature of surface considered (smooth or granular or mineral fines).

** Depending on the physical nature of surface considered (smooth or textured or with backing geotextile).

2.1.6. Geotextiles and related products

ICOLD Bulletin No. 55, Geotextiles as Filters and Transitions for Fill Dams, provides additional information on geotextiles and related products.

Concerning geonets (Fig. 9 to 11), they consist of HDPE polymeric ribs that cross one upon the other and are bonded together crosswise in order to form a

stable net with large openings and high transmissivity. The composition of the raw material shall be verified to guarantee that during their lifetime the physical-mechanical properties are not considerably altered mainly with respect to the transmissivity.

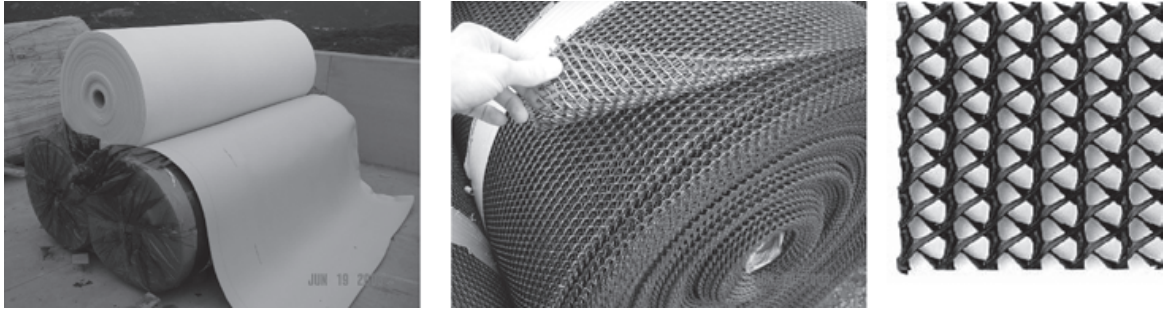


Fig. 9 to 11
Geotextile and geonet

2.2. GEOMEMBRANE TESTING

2.2.1. Type of tests by tasks

The testing applicable to geomembranes, aiming to ascertain their physical, mechanical and environmental endurance properties, can be classified under four main headings:

- *Quality control testing during manufacture:* performed by the manufacturer in the factory, on the process and on the finished product. The type and frequency of testing depends on internal quality control procedures of the manufacturer.
- *Identification testing:* performed by the manufacturer in the factory, and recorded on the geomembrane certificate that thoroughly identifies the product itself. Identification tests do not yield sufficient information to accept or reject a geomembrane with reference to a specified type of loading or attack, since the test specimens are too small to be representative of full-scale behaviour, and the stress is mono-axial.
- *Performance testing:* it has become common practice that designers, and consequently tender documents, require to implement current identification tests with performance tests. Performance tests are made on large samples, and the stress is multi-axial.
- *Compliance testing:* performed by the final user to verify that the supplied geomembrane meets contract specifications. The type and frequency of these tests are defined in contractual documents (see chapter 9).

Many geomembrane test methods and standards are available, or are being developed by standards setting organisations around the world. Other standards that have become of common use are included in this chapter. Appendix 3 of the Bulletin lists some of the more important applicable international standards.

Table 8 summarises the most important tests usually performed.

Table 8
Geomembrane testing

	QC	Identification	Performance	Compliance
Permeability to water	X	X		X
Burst strength	X	X	X	X
Puncture strength (static and dynamic)		X	X	X
Tear strength	X	X	X	X
Impact strength		X	X	X
Frictional characteristics			X	X
Seam peel strength			X	X
Seam shear strength			X	X
Resistance to the environment. Tests assess resistance to chemicals, ozone, UV, microorganisms, temperature, behaviour at contact with water, compatibility with raw water before treatment for human consumption		X	X	X

2.2.2. Index tests and performance tests

Index tests apply the same type of stress on different types of geomembranes. Index tests are generally performed on small specimens subject to a single type of stress. They allow comparison of the behaviour of different geomembranes when subject to the same stress, but are not representative of the behaviour of the geomembrane when subject to the multiple stresses typical of service conditions. If a geomembrane performs better than another in the same index test, the probability that it will perform better in the real environment cannot be evaluated with acceptable accuracy. Index tests are generally used for identification testing.

Performance tests are performed on larger samples, and are conceived so that laboratory testing conditions and stresses correspond as much as possible to the real stresses conditions that the geomembranes will encounter in service. Full-scale performance tests are representative of full-scale behaviour and enable the designer to select the best product for the project.

2.2.3. Chemical analysis and polymer identification

For a geomembrane, it is important to identify the type of polymer of which is made, as it dictates the main properties. To confirm the type of resin used, the most frequently used chemical analysis tests are: Thermogravimetric Analysis, Differential Scanning Calorimetry, Oxidative Induction Time, Thermomechanical Analysis, Dynamic Mechanical Analysis, Infrared Spectroscopy, Chromatography, Molecular Weight Determination, Melt flow index test, Intrinsic Viscosity Determination, Carboxyl End Group Analysis.

2.2.4. Physical/mechanical properties and test methods

The main applicable and relevant properties are listed in Table 10. The following discussion is made only for some properties, and for many of them the scope is obvious.

2.2.4.1. Permeability to water

The permeability to water of a geomembrane should normally be measured as the water vapour transmission. However, since it is quite difficult to test thick geomembranes such as those used in dams, because very low values are difficult to measure, it is more convenient to analyse a geomembrane in terms of its permittivity K/e (K = permeability, e = geomembrane thickness). Permittivity can be calculated by measuring, in the laboratory, the quantity of water passing through the specimen under a specified hydraulic gradient in a specified time.

Permittivity of geomembranes is in the order of 10^{-12} m/s, much lower than that of traditional materials such as concrete. Permittivity can increase if the material is stretched during service.

2.2.4.2. Tensile behaviour: uni-axial on narrow wide strips (Index Test)

The various tensile tests are performed on geomembrane samples that are quite small in their size (usually 50 mm wide strip). In these pure tension tests, a sample of the geomembrane is subjected to a uni-axial force. Results are plotted on a stress / strain curve (Fig. 12) up to failure. Information from this test are not useful for design purposes as any geomembrane liner is subject to a 3 dimensional stress in the field.

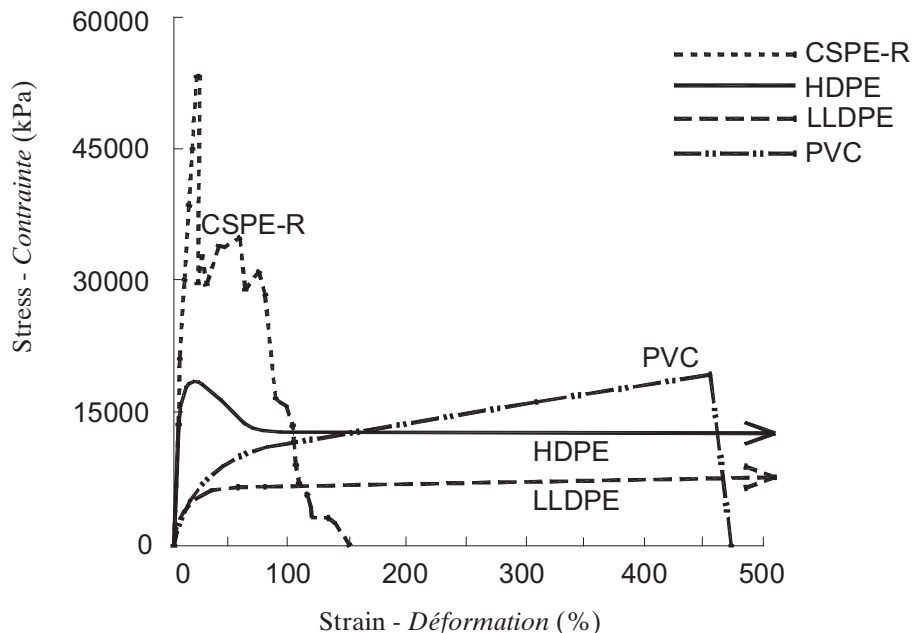


Fig. 12
Uni-axial stress-strain behaviour of strips of various geomembranes
(Courtesy R. M. Koerner)

The scrim reinforced geomembrane CSPE-R resulted in the highest strength, but failed abruptly when the scrim broke. The response did not drop to zero because the geomembrane ply on both sides of the scrim remained intact until ultimate failure occurred. The HDPE geomembrane responded in its characteristic fashion by showing a pronounced yield point (at approximately 10%), dropping significantly and then extending in strain to approximately 1000% when failure actually occurred. The PVC geomembrane gave a relatively smooth response gradually increasing in stress until its failure at about 480% strain. The LLDPE geomembrane also gave a relatively smooth, but lowest strength response until it failed at approximately 700% strain.

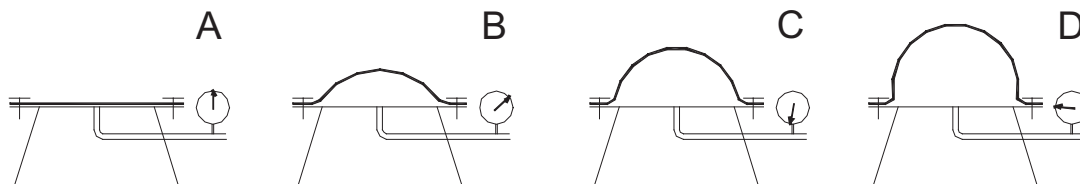
It is important to note that the test procedure used has a strong influence on results, especially the specimen shape and strain rate. From the engineering viewpoint, the stress and strain at failure are less important than the general appearance of the stress strain curve. A relative smooth response is preferable.

Creep tests to determine strain development at constant load and relaxation tests for stress reductions at constant strain are essential complements to these strain-controlled uni-axial tensile tests.

2.2.4.3. Tensile behaviour: axi-symmetric on large samples (Performance Test)

Any geomembrane liner is subject to a 3 dimensional stress in the field. Axi-symmetric tests are more directly applicable to use for design than uni-axial tension tests.

Localised deformation beneath a geomembrane is such a case. This type of behaviour could well be anticipated for a geomembrane used in an fill dam placed over differentially subsiding solid fill material. The situation can be modelled by placing the geomembrane in a hydraulic vessel and pumping water on the geomembrane (Fig. 13 to 16). This test is often referred to as “burst test”. A blister forms in the test sample under the applied pressure. By measuring the amplitude of the deformation, the stress and strain can be measured at any point on the blister for a given applied pressure. The results can be plotted on a stress strain curve comparable to the uni-axial test stress strain curve. Pressure is mobilised until failure of the test specimen occurs. A number of variations of this test have been made. It is currently standardized as ASTM D5716.



- A. Loading starts, pressure = 0 kPa
- B. Geomembrane elongates, pressure increases
- C. Geomembrane elongates, backing geotextile breaks, pressure increases
- D. Maximum geomembrane elongation before breaking. For 3 mm thick PVC geomembrane, pressure at break was 160 kPa, elongation at break >270 %

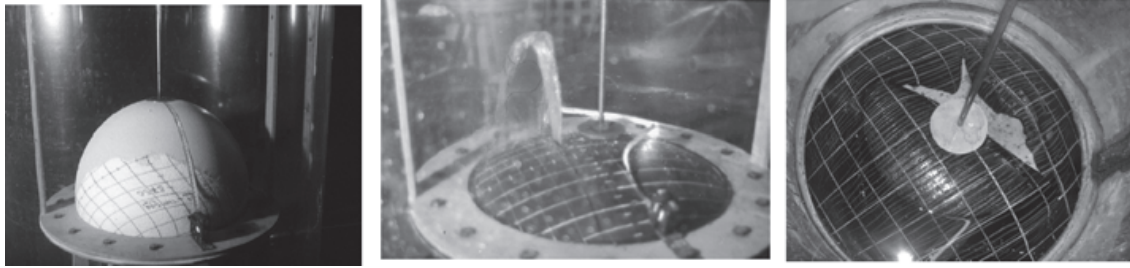


Fig. 13 to 16
 Apparatus to test axi-symmetric tension behaviour,
 PVC (left), HDPE (middle), and bituminous (right) geomembranes

The curves of Fig. 17 have resulted using a 600 mm diameter test vessel, hydrostatically pressurized at a rate of 7.0 kPa per minute. HDPE and reinforced geomembranes like CSPE-R and fPP-R fail at relatively low deflections and strains (but high stresses), whereas extensible geomembranes like PVC, LLDPE, and fPP fail at significantly greater deflections and strains. These results are quite different from those obtained in the index test of Fig. 12. Clearly, the lesson here is that appropriate modelling of a field situation is absolutely necessary if a design-by-function approach is to be used.

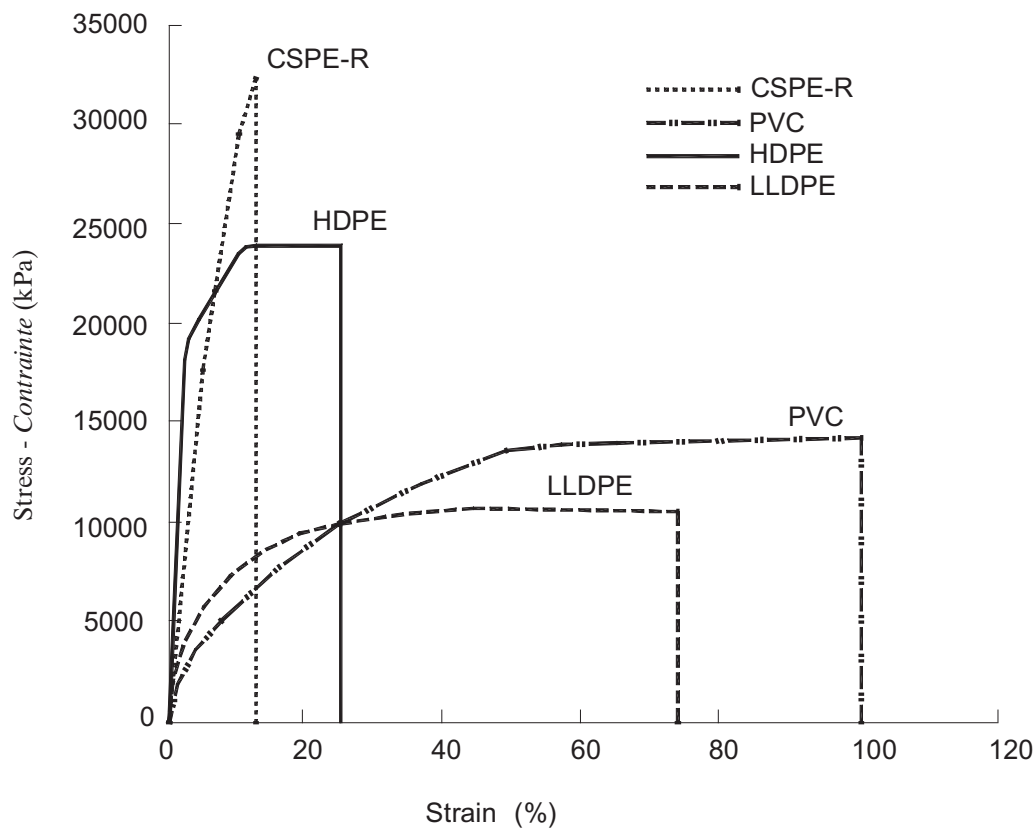


Fig. 17
 Axi-symmetric stress-stain behavior
 (Courtesy R. M. Koerner)

A special performance test was designed for installation of a PVC geocomposite at Bovilla rockfill dam (91 m, Albania, 1996). The test is illustrated in Fig. 18.

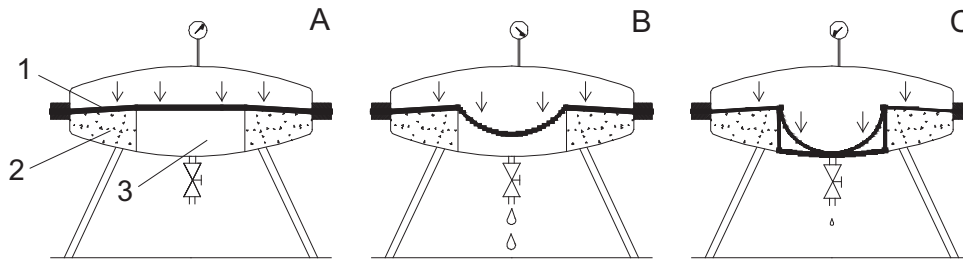


Fig. 18
Performance testing for resistance to differential settlement

1. PVC geocomposite
 2. Actual subgrade (gravel)
 3. Water
- A. Loading completed, constant pressure = 100 m
 - B. Subsidence starts, geocomposite elongates
 - C. Subsidence completed. The 3 mm thick PVC geocomposite elongated 213 % without breaking and without taking full deformation capability

The test is carried out in a pressure vessel. The geocomposite is laid over a support replicating the gravel support layer of the dam. In the middle of the support, a circular hole is created for the entire depth of the vessel. The hole is filled with water thus creating a continuous support gravel/water on which the geocomposite is installed. The vessel is closed and the selected water head is applied. By means of a valve located at the bottom of the vessel, the water inside the hole is instantaneously discharged, thus creating a large cavity beneath the geocomposite. Under the water head, the geocomposite deforms into the cavity. The test ascertains the capability of the candidate geomembrane to withstand sudden differential settlements that entail deformations > 200%. Flexible geocomposite like PVC backed by geotextile perform very satisfactorily.

2.2.4.4. Puncture resistance (Index/performance Test)

Geomembranes placed on and type of aggressive rough subgrade, or soil containing stones, sticks, or other debris, or backfilled, are vulnerable to puncture. Puncture stresses may cause leaks, which in the case of a covered geomembrane are difficult to locate and expensive to repair.

Index tests used by manufacturers for quality control purposes demonstrate, as expected, that greater thickness and reinforcement increase the puncture resistance of a geomembrane.

The unique index test that could allow comparison of all types of geomembranes for the puncture behaviour is the CBR puncture test, according to the EN ISO 12236 standard.

With a nonwoven needle punched geotextile above or below, the improvement in puncture resistance is quite impressive.

The importance of puncture resistance when large stone aggregate is used for drainage or supporting or cover layers in new dams or as supporting subgrade in repairing existing dams, makes the need for a field simulated performance test obvious. Most tests use a large diameter pressure vessel (size of 500 mm is sufficient to eliminate most boundary effects) with the similar or same subgrade beneath the geomembrane test specimen. Several variations are being evaluated:

- The actual subgrade (sand, gravel, stone, etc.) at the targeted density,
- The actual subgrade set in an epoxy cast (so-called “rock pizza”), so as to have the articles in the same configuration for each test,
- Truncated cones in a triangular array to simulate a “worst-case” subgrade condition.

Fig. 19 to 22 show a “worst-case” test in a high pressure testing machine 600 mm in effective diameter, capable of applying water loads up to 250 m of water.

The materials with better behaviour are generally those of the thermo-set type and PVC; the worst is HDPE. PVC presents some high values, basically in homogeneous geomembranes. As the material ages the puncture load usually increases and the values of the distance of the punch (deformation) notably decrease.

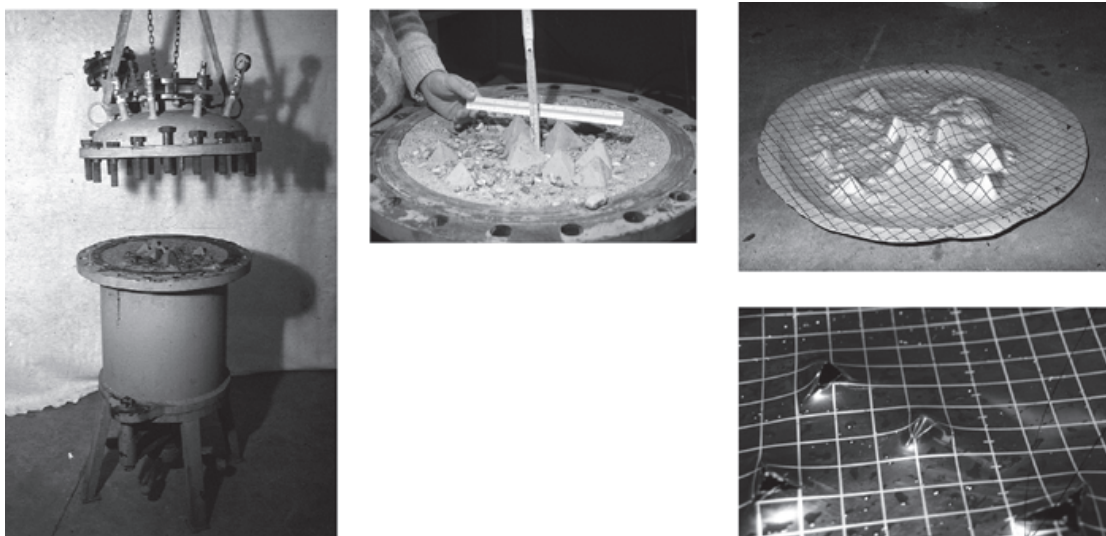


Fig. 19 to 22
Pressure vessel, pyramids subgrade, PVC intact at 1 MPa and HDPE failing at 0.15 MPa
(Courtesy US Army Corps of Engineers)

Research conducted in 1995 by the US Army Corps of Engineers, for underwater installation of geomembranes, has evaluated a number of common geomembranes (PVC, HDPE, CSPE-R, and LLDPE), both with and without geotextile protection layers against reference aggressive subgrade. Their behaviour has been evaluated also in a truncated cone test and in creep testing, to assess the visco-elastic properties of the geomembranes and protection layers. Results are listed in the US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Technical Report REMR-CS-50, of which Fig. 23 to 25 are an excerpt.

MULTIAXIAL PUNCTURE TEST RESULTS SUMMARY	
PVC 1 mm	Rupture at 0.6 MPa (between pyramids at cavity). Conforms to substrate – good elastic recovery.
PVC 1.5 mm	Rupture at 1 MPa after 6 hr (at sharp stone). Conforms to substrate – good elastic recovery.
PVC 2 mm	No failure – Conforms to substrate – very good elastic recovery.
PVC 2.5 mm	No failure – Does not conform perfectly to substrate. Very good elastic recovery.
PVC-R PVC 1 mm + 200 g/m ² NW	Rupture at 1MPa after 10 hr (between pyramids at cavity). Conforms to substrate – Elastic recovery superior to correspondent unreinforced PVC.
PVC-R PVC 1.5 mm + 200 g/m ² NW	Rupture at 1MPa after 10 hr (at sharp stone). Conforms to substrate – Elastic recovery superior to correspond unreinforced PVC.
PVC-R PVC 2 mm + 200 g/m ² NW	No failure – Conforms to substrate. Elastic recovery superior to correspondent unreinforced PVC.
PVC-R PVC 2.5 mm + 500 g/m ² NW	No failure – Conforms to substrate. Elastic recovery superior to correspondent unreinforced PVC.
CSPE-S 1 mm	Rupture at 1 MPA (at pyramids and cavity). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
CSPE-S 1.2 mm	Rupture at 1 MPA (at pyramids and cavity). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
CSPE-S 1.4 mm	Rupture at 1 MPA (at pyramids and cavity). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
CSPE-R CSPE 0.8 + 0.4 mm	Rupture at 0.8 MPa (at sharp stone and cavity). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
CSPE-R CSPE 1mm + 0.4 mm	Rupture at 0.8 MPa (at sharp stone and cavity). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
CSPE-R CSPE 2 mm + 0.4 mm	Rupture at 0.8 MPa (at sharp stone and cavity). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
PP 1.5 mm	Failure at 1 MPa (at pyramids and cavity). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
PP-R PP 1.5 mm + 300 g/m ² NW	Failure at 1 MPa (at pyramids). Conforms to substrate. Poor elastic recovery.
EPDM 2 mm	No failure. Conforms fairly well to substrate. Total elastic recovery.
EPDM 3 mm	No failure. Conforms fairly well to substrate. Total elastic recovery.
HDPE 1.5 mm	Rupture at all pyramids at 0.15 MPa. Does not conform to substrate. No elastic recovery.
HDPE 2 mm	Rupture at all pyramids at 0.3 MPa. Does not conform to substrate. No elastic recovery.
HDPE 2.5 mm	Rupture at all pyramids at 0.35 MPa. Does not conform to substrate. No elastic recovery.
Note : NW = Nonwoven	

Fig. 23
Results of multiaxial puncture testing
(Courtesy US Army Corps of Engineers)

MULTIAXIAL TESTS MEMBRANE MATERIAL EVALUATION

Test 1	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC-	PVC-	PVC-	PVC-	CSPE-	CSPE-	CSPE-	CSPE-R	CSPE-R	CSPE-R	PP	PP-R	EPDM	EPDM	HDPE	HDPE	HDPE
Multiaxial Puncture	1	1.5	2	2.5	PVC R1+ 200	PVC R1.5+ 200	PVC R2+ 200	PVC R2.5+ 500	CSPE- S1	CSPE- S1.2	CSPE- S1.4	CSPE- 0.8+ 0.4	CSPE-R 1+0.4	CSPE-R 1.2+ 0.4	PP 1.5	PP 1.5+ 300	EPDM 2	EPDM 3	HDPE 1.5	HDPE 2	HDPE 2.5					
Test																										
Conformability to substrate	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	5	4	4	4	5	5	4	4	1	1	1
Failure at protrusions (puncture)	5	3	5	5	5	4	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	5	5	1	1	1	5	5	1	1	1
Failure at depressions (burst)	3	5	5	5	4	5	5	5	3	4	4	2	2	2	2	2	5	5	2	2	4	5	5	n.a.	n.a.	n.a.
Elastic recovery	3	3	4	5	3	4	5	5	3	3	3	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	5	5	n.a.	n.a.	n.a.
Total Rating Test 1	16	16	19	19	17	18	20	20	15	16	16	10	10	10	11	13	19	19	2	2	2	19	19	2	2	2

Test 2

Burst Test																										
Homogeneity	4	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	1	1	1	2	2	4	4	1	1	2	4	4	1	1	1
Isotropy	4	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	1	1	1	4	3	4	4	1	1	4	4	4	1	1	1
Capability to deform	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3	3	3	4	4	5	5	2	2	4	5	5	2	1	1
Total Rating Test 2	13	15	15	15	15	15	15	15	12	12	12	5	5	5	10	9	13	13	4	4	10	13	13	4	3	3
Total Rating Test 1 & 2	29	31	34	34	32	33	35	35	27	28	28	15	15	15	21	22	32	32	6	6	21	32	32	6	5	5

n. a. = not applicable due to extreme lack of conformability to substrate
 Numbers indicate membrane thickness in mm + reinforcement identification

Fig. 24
 Evaluation of multiaxial testing
 (Courtesy US Army Corps of Engineers)

Table 4 - Membrane Material Evaluation for Underwater Installation

Property	Weight	PVC		PVC-R		CSPE-S		CSPE-R		PP		PP-R		EPDM		HDPE	
		Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score
Part A																	
Impermeability	5	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25
Tensile behavior	5	4	20	5	25	5	25	5	25	3	15	5	25	4	20	2	10
Tear resistance	5	3	15	5	25	5	25	5	25	3	15	4	20	5	25	4	20
Puncture resistance	5	4	20	5	25	3	15	3	15	3	15	4	20	4	20	2	10
Flexibility	5	5	25	5	25	5	25	3	15	5	25	4	20	5	25	2	10
Specific gravity	5	5	25	5	25	5	25	5	25	1	5	1	5	5	25	1	5
Soumability	4	5	20	5	20	3	12	3	12	4	16	4	16	3	12	2	8
Dimensional stability	1	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4	5	5	4	4	3	3
Total Score A			154		175		157		146		120		136		158		91
Part B																	
Overall constructability	4	5	20	5	20	4	16	4	16	3	12	3	12	4	16	1	4
Previous applications	4	5	20	5	20	4	16	1	4	2	8	2	8	2	8	2	8
Durability	3	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15
Availability	2	4	8	4	8	2	4	1	2	3	6	3	6	3	6	5	10
Repairability	2	5	10	5	10	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	1	2
Cost	2	4	8	4	8	2	4	2	4	3	6	3	6	1	2	5	10
Total Score B			81		81		63		49		53		53		53		89
Total Score A & B			235		256		220		195		173		189		209		140
Rank			2		1		3		5		7		6		4		8

Fig. 25
Final ranking of geomembranes (Courtesy US Army Corps of Engineers)

2.2.4.5. Impact resistance (Index/performance Test)

Falling or impacting objects, including cover layers, can penetrate geomembranes, causing leaks or acting as initiating points for tear propagation to proceed from. Thus an assessment of geomembrane impact resistance is important. A “static” test calls for forcing a rod at constant speed through a geomembrane specimen clamped between a pair of collars over a hole. A “dynamic” test involves dropping an object on the test specimen.

These index tests have been lately implemented with performance testing on full scale, with large stones impacting on candidate geomembranes.

The thicker geomembranes generally have greater impact resistance. Scrim reinforcement does not significantly improve impact resistance. A geotextile layer underlying and/or overlying the geomembrane significantly improves the impact resistance.

2.2.4.6. Tear resistance (Index/performance Test)

Data on the tear resistance are required especially when geomembranes are laid on slopes or inclined surfaces. The tear resistance of many thin, non-reinforced geomembranes is quite low. The implication of this is important during geomembrane handling and installation.

The measurement of tear resistance of a geomembrane can be done in a number of ways. Reinforcement greatly helps this situation. As thickness of the geomembrane increases, tear during installation becomes less of an issue, and the design related tear stresses become the critical values.

2.2.4.7. Interface shear strength (Index/performance Test)

Determination of the lowest interface shear strength of the whole GSS is of critical importance for the proper design of geomembrane sealing system on slopes of fill dams; this point is presented in paragraph 4.2. If the friction is not sufficient, the sliding layer should be anchored or supported. Two test methods are utilised to access the situation: an adapted form of a geotechnical direct shear test and the specific incline plane test (EN ISO 12957/2 standard).

2.2.4.8. Testing of anchorage by embedding (Index/performance Test)

The upper end of a geomembrane liner embedded in an anchor trench at the crest, or embedded in a slot at the bottom perimeter, or the geomembrane clamped against the concrete wall of a bottom outlet are cases where the geomembrane is subject simultaneously to pull-out and compression forces. Design shall address the anchorage depth and normal stress necessary to mobilise the strength of the geomembrane. The target value could be the tensile strength at yield, at scrim break, or at an allowable strain.

2.2.4.9. *Tensile behaviour of seams (Index/performance Test)*

To determine the strength of a geomembrane seam, a number of tests are available. In both shear and peel tests a representative specimen (usually 25 mm wide) is taken across the seam and the non-seamed ends are placed in the grips of a tensile testing machine. It is sometimes considered that the shear test simulates a performance mode, whereas the peel test is more of an index test. Both are important to perform in order to fully evaluate the quality of the seam.

2.2.4.10. *Stress-Cracking (Index/performance Test)*

Stress cracking applies to HDPE geomembrane only, and consists of cracking that occurs at an unpredictable moment in the lifetime of the material, caused by long term tension or compression stresses. Stress cracking is accelerated by high temperatures. Stress cracks appear at points of stress concentration in the sheet, called “stress risers”. Stress risers are typically any abrupt change in material thickness (for instance at the edge of the welds), any notch or score mark of significant depth (for instance impact or scratch of a sharp aggregate), or any non-uniformity material, etc. The most likely initiation points are at seams and particularly for extrusion seams or overheated fusion seams.

To avoid stress cracking, the proper resin is necessary. Currently this is over 150 hours in the single point notched constant load test SP-NCLT (ASTM D5397 Appendix A).

2.2.5. Durability and test methods

The behaviour of a geomembrane shall be studied with respect to its resistance to radiation (chiefly ultra violet), temperature, biological attack, chemicals, and any other environment-related phenomenon that causes polymeric chain scission or bond breaking within the polymer structure, and which may be detrimental to long-term performance. Over time, the polymer tends to become brittle in its stress-strain behaviour, with a consequent loss of ductility, decrease in elongation at failure, increase in modulus of elasticity, modification of the ultimate stress at failure. Repeating over time testing of physical and mechanical properties already discussed in this section allows monitoring the ageing process.

Data on weathering (combined effects of cycles of wetting, temperature change, and exposure to UV light) are required for applications where the barrier will be exposed to weather without adequate protective cover, but it is suggested that they are provided also in the case of a covered geomembrane, as latest research has demonstrated that the ageing process occurs also in presence of a cover layer, but at a significantly lower rate than when exposed.

2.2.5.1. *Ultraviolet radiation (Index/performance Test)*

Ultraviolet radiation results in a degradation of geomembranes. Short wavelength energy for sunlight can penetrate the polymer structure causing chain scission and bond breaking. A number of accelerated laboratory exposure standard tests are available, e.g., the ultraviolet fluorescent tube method or the xenon arc method.

Since it is practically impossible to predict lifetime from these index tests, outdoor long-term (many years, sometimes decades) weathering tests are performed. Extremely useful data are those collected from performance testing on similar types of geomembranes exposed in similar conditions over a consistent number of years.

Geomembranes used in covered sealing systems and not designed for UV resistance shall be protected within 12 hours from deployment.

2.2.5.2. *Thermal aggression*

Various properties of geomembranes are sensitive to changes in temperature. Both warm and cold temperatures have their own unique effects.

2.2.5.2.1. Warm temperatures

Geomembrane materials exposed to heat are subject to changes in physical, mechanical, or chemical properties. The magnitude and duration of exposure determine the extent of this change. The test being of a qualitative nature seems to suggest comparison testing of candidate geomembranes for critical situations or to use new samples for each incubation time and perform tensile tests for comparison purposes.

2.2.5.2.2. Cold temperatures

Testing to evaluate the effect of cold on geomembranes is the exact inverse of the evaluation of the effects of heat. Cold temperatures normally encountered in operation of dams generally do not degrade the geomembrane in any appreciable way. Cold decreases the flexibility and seams are more difficult to make. The proposed seaming method should be tested for the site temperatures.

2.2.5.2.3. Thermal expansion and contraction

Tests determine the coefficient of thermal expansion or contraction and dimensional changes of geomembranes when exposed to variation of temperatures. Stiff, thick materials (e. g. HDPE, Fig. 26) form waves which may badly affect the placement of the geomembrane, make the seaming more difficult, reduce the friction between the geomembrane and the subgrade, induce excessive stresses on the anchors and create preferential paths for infiltration of water. If the weight of the water or of the cover layer pinches the geomembrane at a wave, it will create a preferential path for rupture.

2.2.5.3. *Biological*

There are a tremendous number of living organisms in the soil and in the water. The discussion will be focused only on organisms where there is perceived concern.



Fig. 26 and 27

Waves in stiff HDPE (left and detail, Pactola dam, USA 1987), no waves in flexible PVC (right, Alento cofferdam, Italy 1988)

2.2.5.3.1. Animals

At present there are no established test procedures available, and only intuitively can one say that the stronger, harder, and thicker the geomembrane, the better its resistance to animal attack. As a statistic datum, there are no reported incidents of animal damage in the database.

2.2.5.3.2. Fungi

Fungi include yeast, moulds, and mushrooms. The greatest concern is not polymeric degradation, but the possibility that fungal deposits clog and blind flow in the drainage system often constructed in conjunction with the liner itself. As a statistic datum, there are no reported incidents of damage or clogging by fungi in the database.

2.2.5.3.3. Bacteria

Bacteria are single cell organisms, among the simplest and smallest known forms of life. As with fungi, the greatest concern is fouling and clogging of the drainage systems. As a statistic datum, there are no reported incidents of damage or clogging by bacteria in the database.

2.2.5.3.4. Micro-organisms

There are field and laboratory tests to evaluate resistance to micro-organisms such as:

- Specimens may be buried in severe conditions;
- Specimens may be tested in the laboratory by exposure to a mix of different types of micro-organisms (28 days at 28 °C and 95% relative humidity).

2.2.5.3.5 Roots

Data on root penetration are required in all applications where the geosynthetic barrier is exposed to soils containing restorative vegetation. A European test method is available, based on an original Swiss standard.

2.2.5.4. Chemical aggression (Index / performance test)

The chemical resistance of a geomembrane vis-à-vis chemical aggression has been recognised and manufacturers have developed charts showing the chemical resistance of various geomembranes in contact with a large variety of chemicals.

Table 9

General chemical resistance guidelines of some geomembranes*

Source: “*Designing with geosynthetics*”, by Robert M. Koerner, Fourth edition

Chemical	Geomembrane type							
	PVC		PE		CSPE		EPDM	
	38°C	70°C	38°C	70°C	38°C	70°C	38°C	70°C
General								
Allphatic hydrocarbons			x	x				
Aromatic hydrocarbons			x	x				
Chlorinated solvents			x	x			x	
Oxygenated solvents			x	x			x	x
Crude petroleum solvent			x	x				
Alcohols	x	x	x	x			x	x
Acids								
Organic	x	x	x	x	x		x	x
Inorganic	x	x	x	x	x		x	x
Heavy metals	x	x	x	x	x		x	x
Salts	x	x	x	x	x		x	x

*Abbreviation: x = generally good resistance.

In some specific situations additional testing may be required, for instance:

At the watertight perimeter seal, where the geomembrane is clamped by means of a batten strip and compression distribution layers. Long term compatibility of the geomembrane with the resin bedding layer or rubber gasket is extremely important.

When the geomembrane is welded at a synthetic waterstop of different material.

When the available charts or tables do not list new types and/or formulations of geomembranes.

2.2.5.4.1. Ozone resistance

The materials of the thermoset type (except EPDM that is resistant for its own constitution to this agent) should withstand the test for behaviour to the ozone.

2.2.5.4.2. Contact with water (Index test)

Possible leaching into water of substances contained in the component materials of the geomembrane can be quickly assessed by an accelerated migration resistance test performed, e.g. by immersion of the geomembrane in water at 60 °C over a period of 14 days.

2.2.5.5. Oxidation

Whenever a free radical is created, molecular chain scission can occur, causing ageing. The reaction generally accelerates once it is triggered. Antioxidants are added to the compound to scavenge these free radicals in order to halt, or at least to interfere with, the process. These additives, or stabilisers, are specific to each type of resin. In general, once the geomembrane has been covered with soil, or liquid, degradation by oxidation is greatly retarded.

2.2.5.6. Synergistic effects

Each of the previous degradation phenomena was described individually and separately. In practice, however, it is likely that two, or more, mechanisms are acting simultaneously. Evaluation of these various phenomena is the essence of geomembrane lifetime prediction.

2.2.6. Specific testing for bituminous geomembranes

Alongside the tests that can be performed on all geomembranes there are specific tests that must be performed on bituminous geomembranes.

The characteristics listed below must be defined by the project manager in order to check that the proposed geomembrane is suited to the stresses it will experience on the structure and to the required standards. The values of these characteristics will differ depending on the thickness of the geomembrane and the type of bitumen (oxidised or polymer). In particular, the characteristics that must be specified are the following:

- Flatness of the strips (maximum undulations),
- Durability of the seams (effect of water and temperature),
- Composition (percentage of bitumen, fines and reinforcement),
- Infra-red spectrum,
- Characteristics of the bitumen (ring and ball temperature, penetrability at a given temperature).

2.2.7. CEN Standard EN 13361 “Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams relevant”

A major development has been made in Europe to determine and test the critical characteristics of geomembranes for dams. Since 2001, CEN, the European Community Committee for Normalization, with contribution of experts from all the European member countries, has prepared a project of Standard prEN 13361 titled “Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams relevant”. The proposed standard has been approved by the EC member countries and published in August 2004 as EN 13361. This standard allows manufacturers to describe geosynthetic barriers on the basis of declared values for characteristics relevant to the intended use and if tested to the specified method. It also includes procedures for evaluation of conformity and factory production control.

The standard includes covered and exposed geomembranes. When enforced, the Standard will be extremely useful as no geomembrane product can be taken to the market if not properly labelled. The label will contain the values, indicated by the supplier, relevant to a list of fundamental properties. The values, having been derived through the same testing procedure, are homogeneous for the same types of geomembranes and therefore comparable.

This standard will also be useful for designers, end-users and other interested parties as a tool to define relevant and appropriate characteristics for specifications and on-site quality control.

The characteristics and the test methods to be used are given in Table 10. When the letter H appears, H means that the test is a harmonized test, that is to say a test valid to obtain the CE label, of free circulation in the European market. The CE label is not necessarily indicative of quality, neither has it anything to do with a quality label.

The specification will define which functions and conditions of use are relevant. The producer of the product shall provide the necessary data based on the requirements and test methods described in this standard.

Table 11 adds to the applicable European test standards the corresponding standards used in North America (ASTM standards).

Another aspect to consider is the possibility of recycling of the material in accordance with an approved technology. However, in consideration of the long durability expected for a geomembrane in a dam, recycling at the end of the life cycle shall not be one of the most important ranking parameters.

The manufacturer shall give the characteristics expressed as mean values and tolerance limit(s) corresponding to the 95% confidence level, based on the statistical interpretation of his internal quality control measurements.

Information about durability shall be expressed in accordance with the appropriate guidelines.

The marking of the products shall be according to EN ISO 10320. Initial type tests shall be carried out by the manufacturer to define the values of the properties, and shall also be carried out on existing products when a change in the basic materials or manufacturing procedures affects the declared properties.

Table 10
 Properties and test methods required by the European Standard EN 13361
 for the use of geomembranes in dams

		Geomembrane covered in service		Geomembrane not covered in service		Test Methods		Remarks
		Polymeric	Bituminous	Polymeric	Bituminous	Polymeric	Bituminous	
Physical properties	Thickness	A	A	A	A	EN 1849-2	EN 1849-1	
	Mass per unit area	A	A	A	A	EN 1849-2	EN 1849-1	
Hydraulic properties	Water permeability (liquid tightness)	H	H	H	H	prEN 14150	prEN 14150	
Mechanical properties	Tensile strength	H	H	H	H	ISO 527	EN 12311-1	For polymeric geomembranes, use ISO 527, parts 1 and 3, test specimen type 5 at a speed of 100 mm/min and report the maximum strength according to the test method.
	Elongation	A	A	A	A	ISO 527	EN 12311-1	For polymeric geomembranes, use ISO 527 parts 1 and 3, test specimen type 5 at a speed of 100 mm/min; calculation of elongation as defined in ISO 527-1, 10.2, using grip separation measurement.
	Static puncture	H	H	H	H	EN ISO 12236	EN ISO 12236	
	Burst strength	S	S	S	S	prEN 14151	prEN 14151	

Table 10 (continued)

		Geomembrane covered in service		Geomembrane not covered in service		Test Methods		Remarks
		Polymeric	Bituminous	Polymeric	Bituminous	Polymeric	Bituminous	
	Tear strength	S	S	S	S	ISO 34	EN 12310-1	For polymeric geomembranes, use ISO 34 method B, angle specimen (Fig. 2) without nick at a speed of 50 mm/min.
	Friction direct shear	S	S	-	-	EN ISO 12957-1	EN ISO 12957-1	
	Friction Inclined Plane	S	S	-	-	EN ISO 12957-2	EN ISO 12957-2	
Thermal properties	Low temperature behaviour (flexure)	S	S	S	S	EN 495-5	EN 1109	
	Thermal expansion	A	-	A	-	ASTM D 696-91	-	
Durability and chemical resistance	Weathering	H	H	H	H	EN 12224	EN 12224	
	Micro organisms	A	A	A	A	EN 12225	EN 12225	
	Oxidation	H	H	H	H	prEN 14575	prEN 14575	
	Environmental stress cracking	H	-	H	-	ASTM D 5397-99 (appendix)	-	Only applicable to PE polymeric geomembranes
	Leaching (water soluble)	A	A	A	A	EN 14415	EN 14415	
	Root penetration	S	S	S	S	prCEN/TS 14416	prCEN/TS 14416	

Legend:

H: properties relevant to all conditions of use and subject to harmonisation

A: properties relevant to all conditions of use and not subject to harmonisation

S: properties relevant to specific conditions of use and not subject to harmonization.

Table 11
Comparison of test methods between EN ISO and ASTM standards
for the use of polymeric geomembranes in dams

		Test Methods for Polymeric Geomembranes	
		EN ISO	ASTM
Physical properties	Thickness	EN 1849-2	ASTM D5199 & D5994, depending if smooth or textured
	Mass per unit area	EN 1849-2	ASTM D792 & D1505 for the density evaluation
Hydraulic properties	Water permeability (liquid tightness)	PrEN 14150	ASTM E 96
Mechanical properties	Tensile strength	ISO 527	Index tests: ASTM D6693, D882, & D751, depending on type of polymer Performance test: ASTM D 5716
	Elongation	ISO 527	Index tests: ASTM D6693, D882, & D751, depending on type of polymer Performance test: ASTM D 5716
	Static Puncture	EN ISO 12236	Index test: ASTM D4833 Performance test: ASTM D 5514
	Burst Strength	PrEN 14151	ASTM D 5617
	Tear strength	ISO 34	ASTM D1004, D751, D1424, D2263, D1938 & D5884
	Friction Direct Shear	EN ISO 12957-1	ASTM D5321
	Friction Inclined Plane	EN ISO 12957-2	No standard
Thermal properties	Low temperature behaviour (flexure)	EN 495-5	No standard
	Thermal expansion	ASTM D 696	ASTM D 696
Durability and chemical resistance	Micro organism	EN 12225	ASTM G21 for fungi ASTM g22 for bacteria
	Oxidation	prEN 14575	ASTM D3895 & D5885
	Environmental stress cracking	ASTM D 5397	ASTM D 5397
	Leaching (water soluble)	EN 14415	No standard
	Root penetration	prCEN/TS 14416	No standard

2.3. AGEING OF GEOMEMBRANES. FIELD EXPERIENCE

In 2009, 50 years have elapsed since the first geomembrane was placed in a dam (Contrada Sabetta, Italy, 1959, covered). There are geomembranes that were incorporated in the design phase for watertightness during the construction of the dam and dams whose watertightness has been restored with geomembranes some 30 years ago. In many of these dams, the geomembranes have been placed in exposed position, and their satisfactory performance up to date and current properties are an assurance that these materials will perform satisfactorily over similar lengths of time, or even longer.

The composition and the quality of the geomembrane dictate its behaviour over time. In general all geomembranes behaved in a satisfactory way. The very few unsuccessful cases refer to old types of geomembranes no longer manufactured or of an inadequate design. Geomembranes designed and produced today will profit of a more sophisticated design, manufacturing, control, and installation technology and therefore a much longer durability is expected.

Usually the ageing of geomembranes is higher in those areas most exposed to the environment such as those facing South (in northern hemisphere), above the maximum water level and in the fluctuation zone. Those areas are usually the most easily accessible, therefore routine or extraordinary maintenance, including replacement, would not be a major problem nor involve high expenses.

Table 12
Oldest geomembranes installations by type of geomembrane

Type	Basic material	Abbreviation	Total exposed	Total covered	Total	Oldest exposed	Oldest covered
Polymeric	Polyvinylchloride - Plasticised	PVC-P	80	73	153	1974	1960
Polymeric	Polyolefin	LLDPE	0	29	29	-	1970
Polymeric	Polyolefin	HDPE	3	12	15	1994	1978
Polymeric	Elastomeric	Polyisobutylene IIR (Butyl Rubber), EPDM	5	4	9	1982	1959
Polymeric	Chlorosulfonated polyethylene	CSPE	3	5	8	1981	1986
Polymeric	Polyolefin	PP	3	3	6	1995	2000
Polymeric	Chlorinated polyethylene	CPE	0	3	3	-	1970
Bituminous	Oxidized bitumen	Prefabricated GM	7	10	17	1973	1978
Bituminous	Polymeric	SBS, bitumen ethylene, ECB	0	3	3	-	1996

2.3.1. Lifetime prediction based on field results

There are many laboratory tests to predict the lifetime performance of the synthetic geomembranes for use in waterproofing of dams. Although a general and comparative indication can be obtained by lab tests, the reality can be different: the atmospheric conditions, the support, the enclosed water and the conditions due to operation of the reservoir may be such, that what initially was found in the laboratory to be satisfactory and meet effective specifications, may over time not correspond to expectations. To provide the best appreciation of the long-term durability of a geomembrane, monitoring of geomembranes already installed is the best option.

Establishing which tests should be made in the case of materials already installed to check their condition and integrity and whether protection or removal and re-installation should be considered, is much more difficult than for newly manufactured materials. Logically, these tests specify the use of small quantities of the geomembrane, and must be sufficiently extensive to determine the conditions of the geomembrane. The tests will be a function of the nature of the material; in a PVC geomembrane it would be indispensable to determinate the plasticisers' content, but that would not be appropriate in other materials. At a general level, one should identify the tests which are essential, such as:

- Permeability
- Low temperature behaviour
- Tensile strength and elongation
- Dynamic puncture
- Static puncture
- Joint strength shear and peeling.

Another issue is where to place the experimental areas. Testing should be performed in different parts of the dam: top, fluctuation and bottom areas, and at different orientations. The number of the tested specimens should be a function of the extent of the work. However, the most important area is the one at the top in northern regions (in north hemisphere).

Another important aspect is the frequency of testing of samples; in general, after installation a certain period of time can pass before testing is performed; after the geomembrane has been installed for some years, inspection should be carried out periodically.

The following paragraphs give some information of field results of most frequently used geomembranes as found from the database.

2.3.1.1. *Plasticised Polyvinyl Chloride (PVC)*

Exposure to heat and UV radiation often causes PVC geomembranes to lose part of their plasticisers. This causes the geomembrane to lose some of its flexibility, to varying degrees, depending on the plasticisers used. The choice of plasticiser(s) is absolutely critical. At a low molecular weight, plasticisers loss can be within months in an exposed condition, leaving the geomembrane in a very brittle condition. Permeability is not altered.

CESI (Italy) have dug up samples of exposed PVC geomembranes from 6 of Italian dams, where they had been in service for different periods of time, varying from 19 to 2 years. The unearthed samples have been tested for plasticisers content, hardness, tensile properties and permeability. The decrease in plasticisers content resulted in slightly higher modulus and resistance. The functionality of the geomembrane was not affected: the permeability coefficient was “quite constant vs. time”. Recovery of exposed PVC geomembranes installed in canals owned by ENEL confirmed the same satisfactory results.

Long term performance in contact with saline or acid solutions and hydrocarbons is satisfactory, although some deterioration in chemical and mechanical properties has been reported. The behaviour of welded seams is satisfactory and constant over time. Therefore, if repair of the geomembrane is needed over the time, seaming of new material over the old is possible and simple.

Table 13
PVC geomembranes in dams (as of December 31 2006) *

PVC ONLY	Total (Exposed + Covered + Partially covered + not known)	Exposed	Covered
Total dams	156 (including 1 dam of 1 dam unknown type)	80 (including of unknown type)	72
Fill dams	83	23	57
Concrete / gravity dams	41	40	1
RCC dams	31	16	15
Highest dam [m]	198	188	198
Oldest installation was in year	1960 (Terzaghi, Canada)	1974	1950
Most recent installation was in year	2006	2006	2006

* Installation of exposed and covered systems continuing up to date.

2.3.1.2. *Low Linear Density Polyethylene (LLDPE) and High Density Polyethylene (HDPE)*

This polymer exhibits remarkable chemical stability when exposed to heat, ultra violet radiation and chemicals. These properties however make seaming quite difficult and delicate. If the proper resin is not selected, HDPE is subject to stress cracking, which may result in cuts and tears. The stiffness, which is a function of density, creates wrinkles in the geomembrane, which reduces friction on the subgrade and creates channels, which are a preferential path for infiltration of water. The material has limited out-of-plane flexibility, which requires a solid subgrade. They have been used mainly in covered situations, such as in fill dams.

Table 14
LLDPE geomembranes in dams (as of December 31, 2006)

LLDPE ONLY	Total (Exposed + Covered + Not known)	Exposed	Covered
Total dams	30	0	29
Fill dams	27	0	26
Concrete / gravity dams	2	0	2
RCC dams	1	0	1
Highest dam [m]	185	–	185
Oldest installation was in year	1970 (Atbashinsk, Kirgizistan)	–	1970
Most recent in installation was year	2000	–	2000

Table 15
HDPE geomembranes in dams (as of December 31, 2006)

HDPE ONLY	Exposed + Covered + Not known	Exposed	Covered
Total dams	16	3	12
Fill dams	15	3	11
Concrete / gravity dams	0	0	0
RCC dams	1	0	1
Highest dam [m]	45	45	42
Oldest installation was in year	1978 (Bitburg, Germany)	1994	1978
Most recent installation was in year	1994	1994	1993

2.3.1.3. *Elastomeric*

Elastomeric geomembranes gradually degrade from ozone exposure, and the process is faster under stress.

Butyl rubber is highly sensitive to hydrocarbons, even small quantities floating as a film on top of the water. Samples of butyl rubber geomembrane taken from operational dams after they had been in place for ten years exhibited signs of increasing rigidity, which was greater in parts exposed to the weather.

Table 16
Elastomeric geomembranes in dams (as of December 31, 2006)

ELASTOMERIC ONLY	Exposed + Covered + Not known	Exposed	Covered
Total dams	11	5	4
Fill dams	11	5	4
Concrete / gravity dams	0	0	0
RCC dams	0	0	0
Highest dam [m]	66.6	66.6	32.5
Oldest installation was in year	1959 (Contrada Sabetta, Italy)	1982	1959
Most recent installation was in year	1994	1994	1988

2.3.1.4. Chlorosulphonated Polyethylene (CSPE)

CSPE, under the trademark Hypalon, cross links as it ages. Repairs become more difficult with the passage of time as the product vulcanises. It is usually reinforced with a polyester scrim.

Table 17
CSPE geomembranes in dams (as of December 31, 2006)

CSPE ONLY	Exposed + Covered + Partially covered + Not known	Exposed	Covered
Total dams	9	3	5
Fill dams	7	2	4
Concrete / gravity dams	2	1	1
RCC dams	0	0	0
Highest dam [m]	200*	200*	186*
Oldest installation was in year	1981 (Kölnbrein, Austria)	1981	1986
Most recent installation was in year	1988	1981	1988

* Partial application at heel.

2.3.1.5. Polypropylene (fPP)

Polypropylene is of fairly recent application on dams and there is not much available information. Results in other types of application may raise doubts on expected service life.

Table 18
PP geomembranes in dams (as of December 31, 2006)

PP ONLY	Exposed + Covered + Not known	Exposed	Covered
Total dams	6	3	3
Fill dams	6	3	3
Concrete / gravity dams	0	0	0
RCC dams	0	0	0
Highest dam [m]	46	16.5	46
Oldest installation was in year	1995 (La Contraviesa, Spain)	1995	2000
Most recent installation was in year	2004	2004	2000

2.3.1.6. Chlorinated Polyethylene (CPE)

CPE has good chemical stability to heat, ultra violet radiation and some chemicals. There is some tendency to absorb water at higher temperatures. It can be scrim-reinforced or not, depending on the required flexibility.

Table 19
CPE geomembranes in dams (as of December 31, 2006)

CPE ONLY	Exposed + Covered	Exposed	Covered
Total dams	3	0	3
Fill dams	2	0	2
Concrete / gravity dams	1	0	1
RCC dams	0	0	0
Highest dam [m]	70	–	70
Oldest installation was in year	1970 (Odiel-Perejil, Spain)	–	1970
Most recent installation was in year	1980	–	1980

2.3.1.7. Bituminous geomembranes

Highly resistant to ultra violet radiation, resistant to accidental chemical contamination of reservoir water except for hydrocarbons and organic solvents.

Bituminous geomembranes have been used in fill dams and mostly in France. If there is no protective layer, they may be liable to the phenomenon of “mud-curling”, superficial micro-cracks in the presence of a deposit of clay fines; but this degradation affects only the physical appearance and remains limited to the surface without altering the tightness of the geomembrane.

Table 20
Bituminous geomembranes in dams (as of December 31, 2006)

BITUMINOUS ONLY	Exposed + Covered + Not known	Exposed	Covered
Total dams	20	7	13
Fill dams	20	7	13
Concrete / gravity dams	0	0	0
RCC dams	0	0	0
Highest dam [m]	55	55	43
Oldest installation was in year	1973 (Banegon, France)	1973	1978
Most recent installation was in year	2000	1990	2000

2.3.2. The Spanish experience

Spain has installed a large number of geomembranes of all types in large reservoirs, and in different climates. The large majority of the reservoirs have exposed geomembranes. For many years a comprehensive investigation programme has been ongoing to assess performance and therefore durability of geomembranes in a range of situations. Their behaviour can be considered similar to that which would have been if installed in dams. Therefore these important findings are included in the database.

Field control is made over time in many reservoirs with a large number of geomembranes of different types and manufacture. An artificial bank has been built in the reservoir of El Saltadero, south of Tenerife, where a series of materials, including some new installation, are being tested.

2.3.3. Roofing experience

The application of using a geomembrane on a flat roof of industrial buildings is one where valuable information for durability can be obtained. The geomembrane is usually exposed to the atmosphere. The main types being used are PVC-P, PVC-P-R, CSPE-R, EPDM-R, and only recently fPP-R. Some have experienced 30-year of acceptable performance.

2.4. GEOTEXTILES AND RELATED PRODUCTS: PROPERTIES AND TEST METHODS

Geomembranes are generally used with geosynthetics. The designer should always take into account the whole GSS and performance tests shall be made on the geosynthetic(s) with the geomembrane.

The designer can refer to the CEN standards 13252 and 13254, dedicated to separation, filtration and drainage in dams; a table of tests is given for geomembranes in dams.

2.5. CONCLUDING REMARKS

In dam application experience has shown that not all geomembranes are practically useable, even if theoretically most geomembranes can be used if a satisfactory design is adopted.

In cases of exposed geomembranes, the choice is more limited as the constraints for their use are greater (mainly durability, anchoring and constructability). PVC has shown by far to be the most frequently used option. However, careful selection in the type of plasticisers is critical. Low molecular weight plasticisers are very unstable and can easily migrate. PVC geomembranes are those offering the widest range of quality: from very good to extremely bad. Previous successful experience of the same geomembrane and same manufacturer are extremely important as discussed in Chapter 9.

For covered applications, the constraints are fewer as durability is partially compensated by the presence of the cover layer, which also provides a ballasting action. Constructability, puncture resistance and resistance to deformation (in case of settlement of the subgrade) are the main issues. A wider range of geomembranes is possible. In general, more flexible geomembranes are preferred to stiffer ones.

3. LOADS APPLIED TO GEOMEMBRANE SEALING SYSTEMS (GSS)

3.1. INTRODUCTION

Geomembrane Sealing Systems (GSS) are currently applied on all types of dams, both for rehabilitation and for new construction. Table 21 schematises the possible applications, which are further detailed in chapters 4 (fill dams), 5 (concrete dams) and 6 (RCC dams).

The present Chapter addresses the loads present on the GSS in all types of dams. The loads related to specific types of application, and the design of the GSS for fill dams, concrete dams and RCC dams, are addressed in the relevant chapters.

The design of the GSS must be made in conjunction with the overall design, stability and safety of the dam like for any another liner.

3.2. MECHANICAL LOADS

Mechanical loads are exerted on the GSS during installation and subsequently during operation of the reservoir. A distinction can be made between loads that result in tensile stresses in the geomembrane, and loads that result in damage of the geomembrane due to puncturing. Mechanical loads can be static such as: gravity, hydrostatic pressure, air pressure, etc., or dynamic such as: wind, wave action, ice action, impact by dropping particles, flowing water (near spillway and outlets) etc.

3.2.1. Gravity load

Gravity loads result in tensile stresses in the geomembrane. Gravity loads include:

- The self weight of the geomembrane; during installation, it is the weight of the entire geomembrane sheet; after installation, it is the weight of the part of geomembrane between two adjacent anchorage lines/points.
- If applied, the weight of the cover layer laid on top of the geomembrane, increased by compaction loads during its placement.

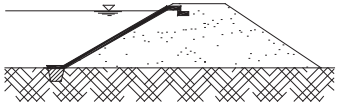
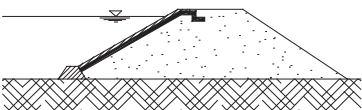
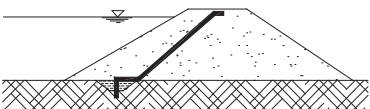
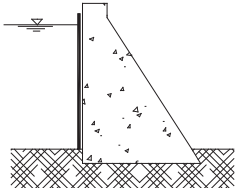
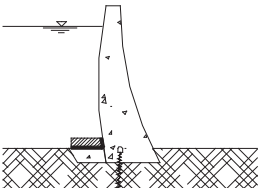
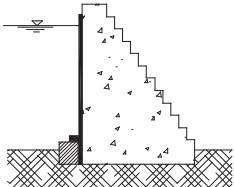
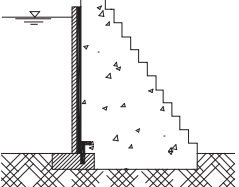
The remedy to the effect of gravity loads may be to increase the tensile strength of the geomembrane by a better performing geomembrane and/or reinforcement, and to provide an adequate anchorage of the geomembrane.

Gravity load also results in skin friction on the geomembrane and in shear stress on inclined surfaces. The remedy to shear stresses is proper anchoring or stabilisation of the cover layer.

3.2.2. Subgrade differential deformation

The mechanical load applied by differential deformation of the subgrade generally only affects fill dams, and the following considerations should be extended

Table 21 - GSS on dams

Figure	Total	Type of application Some typical examples
	47*	Upstream exposed geomembrane on fill dam: Arcizans (France), Cracow (Australia), Midtbotnvatn (Norway), Moravka (Czech Republic), Regulating Reservoir (USA), Sa Forada (Italy), Upper Pond Okinawa (Japan), Winscar (UK)
	106	Upstream covered geomembrane on fill dam: Bovilla (Albania), Contrada Sabetta (Italy), Jibiya (Nigeria), Middle Creek (USA), Rouchain (France), Symvoulos (Cyprus), Wenholthausen (Germany)
	20	Central geomembrane on fill dam: Atbashinsk (CSI), Fencheng (China), Hongya (China), Zushou (China), Goose Lake (USA)
	42*	Upstream exposed geomembrane on concrete/masonry dam: Beli Iskar (Bulgaria), Brändbach (Germany), Butgenbach (Belgium), Chambon (France), Illsee (Switzerland), Kadamparai (India), Lago Nero (Italy), Lost Creek (USA), Pracana (Portugal)
	5**	Upstream covered geomembrane on concrete dam: Dashicun (China), Katse (at heel, Lesotho), Zillergründl (at heel, Austria)
	17	Upstream exposed geomembrane on RCC dam: Balambano (Indonesia), Concepcion (Honduras), Miel I (Colombia), Mujib (Jordan), Olivenhain (USA), Riou (France), Wenquanbao (China)
	17	Upstream covered geomembrane on RCC dam: Buckhorn (USA), Burnett River (Australia), Hunting Run (USA), North Fork Hughes River (USA), Penn Forest (USA)

* Data with GM partially exposed and partially covered have been included in the exposed section.

** All cases with the exception of one in China refer to applications at heel in limited areas.

to concrete and RCC dams only in presence of active joints and localised differential deformation, which may occur in case of weakness of foundation or in case of seismic events.

Differential deformation of the subgrade concerns mainly:

- Dam foundation with compressible material and/or changing compressibility,
- Compressible dam fill or dam fill with changing compressibility,
- Sudden changes in the slope inclination of the abutment especially at the foot of the valley flanks,
- Interfaces with concrete structures;
- Areas at the top of the dam where the geosynthetic layers may be anchored in the fill.

The tensile characteristics (elongation and elasticity) of the geomembrane, and the design of the interface (connections with concrete structures, support at joints), are most important factors to consider in the selection of the geomembrane to adequately overcome the tensile stresses caused by differential deformations.

3.2.3. Puncture load

Loads from sharp edges or falling objects will create concentrated loads which normally result in a puncture of the geomembrane. This load can occur at three different times in the life of the structure:

- While installing the geomembrane, from dropped tools or by snags and tears caused by workmen and construction equipment, and, mainly in fill dams, by workmen walking over the geomembrane;
- On fill and RCC dams, while placing the cover layer or building concrete structures; it must be stressed that construction of the cover layer is the most crucial step in all covered GSS, and as such must be performed with the utmost care;
- After the dam has become operational, by hydrostatic pressure forcing the geomembrane against sharp particles in the supporting layer, by dropping stones, floating debris, ice, etc., or from damage by tools and equipment occurring during maintenance works. Puncture load can also occur due to vandalism.

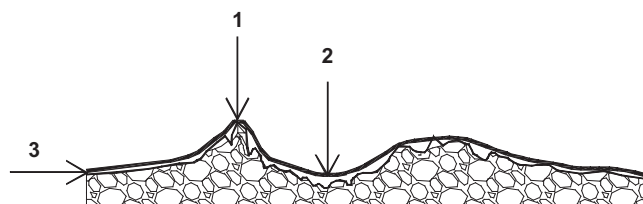


Fig. 28

Loads by rough supporting layer

- 1 Possible puncture
- 2 Possible burst
- 3 Geomembrane

To avoid damage during the construction period, in fill dams a geotextile overlay is very useful to protect against impacts from protective blocks or stones and pedestrian traffic.

Vehicles and plant should not travel directly on the geomembrane. Vehicles may run on a cover layer based on full scale performance tests. Usually acceptable distribution of loads occurs with at least 30 cm thick layer of fine graded soil, and tracked vehicles are better than wheeled vehicles.

The use of geotextile over- and underlayers is often recommended. Factory-made geomembrane/geotextile composites are attractive in this respect because they are effective in preventing puncturing and sliding, because of the increased friction angle. Geocomposites reduce risk of lifting by wind during installation and allow quicker installation.

Damage from sharp particles in the supporting layer can be avoided by using a protective geosynthetic underlayer, and in fill dams by an underlying layer of sand or stabilised gravel. If there is no underlayer, the supporting layer must be inspected thoroughly before allowing the geomembrane to be laid on it. In concrete and RCC dams, excessive irregularities should be made uniform, and honeycomb areas filled. In fill dams, to guarantee that larger and sharp particles of the dam fill will not come into contact with the geomembrane if the supporting layer is eroded by seepage, an efficient drainage system is generally provided behind the geomembrane and provision is generally made for monitoring.

During operation, damage from impact by floating debris, wildlife etc. can be successfully overcome by the use of a robust geomembrane. Alternatively, a cover layer can be used.

Special care should be taken when applying geomembranes of the thermoset type due to their low resistance to dynamic impact. In these geomembranes, when a puncture commences, it can evolve in a tear that may subsequently lead to total breakdown of the geomembrane. It should also be kept in mind that impact loads strongly affect polyethylene geomembranes.

3.2.4. Wind load

Wind can exert uplift forces on the geomembrane while it is being installed, and during service if it remains exposed. Uplift forces develop when an air mass decelerates due to air turbulence, or when it encounters irregular boundary shapes. These events cause a separation in the wind flow. Downwind from the separation of the wind flow, a wake of turbulent eddies is formed and the air flow reverses. This results in uplift forces being exerted on the surface of the geomembrane. There can be also an uplift when the wind blows underneath the geomembrane. If uplift forces are excessive relative to the weight of the geomembrane and to its anchorage (temporary or permanent), the geomembrane will be uplifted and pulled out of position. In this event, the geomembrane can easily be torn and severely damaged by over-stressing.

For short term stabilisation and depending on the wind velocity, on the dam face the geomembrane should be weighted down by sand bags, tyres, concrete blocks, etc., or temporarily fastened to mechanical anchorage lines or points. Anchorage, even temporary, at the top edge, is recommended.

In exploded geomembrane systems, uplift by wind is an important factor in the design of the permanent anchorage system for the geomembrane. Uplift depends on the wind velocity. The following Table 22 illustrates the maximum theoretical uplift pressure “P” on a flat surface versus wind velocity “v”.

Table 22
Uplift pressures related to wind velocity

v [km/h]	20	40	60	80	100	140	180
P [Pa]	20	80	170	310	480	920	1520

The uplift to be used in calculating the permanent anchorage should consider the theoretical uplift, and the actual conditions at the site, which are a function not only of wind velocity but also of the topography, of the wind direction, of the altitude above sea level, and of a reduction factor due to the inclination of the slopes. The approach, the calculation methods, and the reduction factors are contradicted among various authors. An aerodynamic study to ascertain the real uplift due to the wind is beneficial to avoid over-designing the permanent anchorage.

Whatever the anchorage system, it is recommended to stabilise the geomembrane as soon as practical.

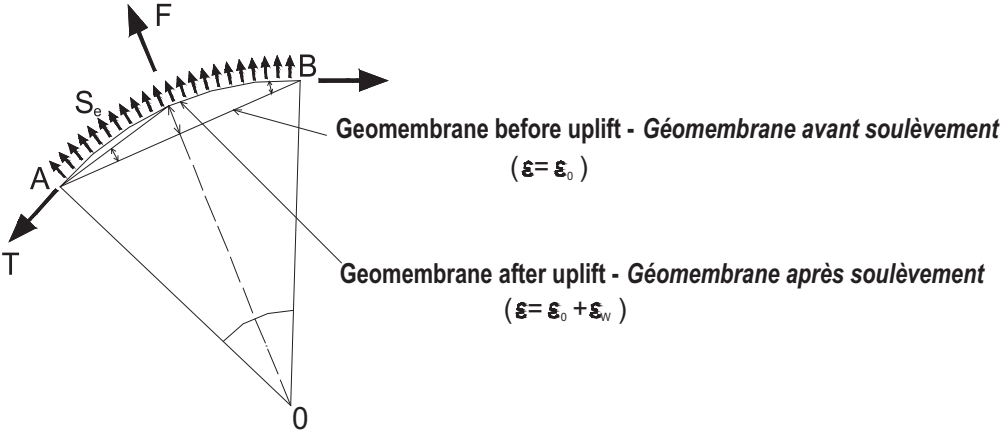


Fig. 29
Calculation of uplift force



Fig. 30
Okinawa reservoir, Japan. Effect of wind uplift on an exposed geomembrane anchored by continuous lines. Photo taken during a typhoon, wind velocity > 175 km/h

3.2.5. Reservoir waves

Dynamic wave action may repeatedly deform an exposed geomembrane with fatigue effects on certain properties of some materials, and may cause uplift tension stresses by suction.

Waves may also move the cover layer and even destroy the supporting base layer, and may loosen the anchorage. The consequences may be overstressing of the system and may lead to the destruction of the geomembrane.

The remedy to prevent damage by wave action may be the design of a sufficiently strong anchorage, and the selection of adequate stone sizes in the cover layer with respect to the wave action.

In fill dams with an exposed geomembrane and independent geotextile layer, action of waves may produce a washing of the slope that can cause the breaking of the geotextile, which detaches from the anchorage and usually slides in a bundle to the bottom of the reservoir, while the geomembrane remains floating in the water, without support, with increasing risk to the works. Again geocomposites are advantageous for their higher resistance to wave action. Action of waves may have an impact on the property of the geomembrane, for instance extraction of plasticizers in PVC geomembranes (see also 3.3.2 Ultra Violet radiation).

3.2.6. Ice in the reservoir

Ice does not adhere to smooth pore-less geomembranes, and the possibility of shear forces is therefore very limited. Floating ice slabs and blocks, in the area of fluctuation of the water level, can damage uncovered thin geomembranes by puncturing, acting as a dynamic load. Exposed robust and thick geomembranes in gravity and in fill dams subject to heavy ice loads have not been affected by ice action even at drawdown. Laboratory evidence by Hydro Québec confirms field results. In case of small reservoirs where the lowering of the water level is quick, the risk of damage on inclined surfaces, and on horizontal surfaces (berm, bottom), is higher.

When in presence of thick ice on the upstream face of the dam where an exposed geomembrane is used, much attention shall be given to the fastening system. In fact the ice can move because it follows the variation in the level of the reservoir or because it slides along the abutments. In such a case, fastening systems of the geomembranes exposed to ice shall be evaluated because, if they offer resistance to the sliding movement of the ice, then they can be affected and damaged.

The impact by floating ice can be reduced by a cover layer on the surface. Since growing of ice does not stick to the geomembrane, the bubbler system, often used to avoid ice formation on concrete surfaces, is not essential for exposed geomembrane sealing systems.

3.2.7. Uplift from water or air

Uplift by water may develop during rapid drawdown conditions, if the underlying dam material is saturated for any reason (high tailwater level, leakage, etc.) and no drainage behind the geomembrane is provided. Warming up of the



Fig. 31 to 35

Top left, Camposecco masonry dam, Italy 1993: Impact by ice has not damaged exposed 2.5 mm thick PVC geomembrane. Top right, Midtbotnvatn CFRD, Norway 2004: The exposed 2.5 mm thick PVC geomembrane during installation on the lower, older part of the dam.

In winter at Midtbotnvatn several layers of ice stick to the upper, unlined concrete slabs, hanging on top of the lined section. As temperature changes, blocks of ice 50 to 80 cm thick in multiple layers break and fall from the top down unto the geomembrane underneath.

The fall of ice blocks has not damaged the exposed geomembrane but has affected the fastening steel profiles that protrude over the surface.

geomembrane sealing system by sun radiation can result in uplift created by vapour pressure resulting from natural humidity of the dam. Air encapsulated beneath the geomembrane can produce uplift either when it is warmed up, or subsequent to a sudden drop of outside air pressure.

An adequate and ventilated face drainage system under the geomembrane will avoid these uplift pressures which otherwise can lead to tension in the geomembrane and form blisters.

If the geomembrane is used as a blanket and extends upstream of the dam toe over the reservoir bed, decomposing organic matter and changes in groundwater level may cause gas or air pockets to be trapped underneath. Provision must be made for collecting the gases separately and venting them at high points.

3.3. PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL ATTACK

Physical, chemical and biological attacks are exerted on the GSS during operation of the reservoir.

3.3.1. Heat

The mechanical properties of geomembranes vary with temperature, e.g. higher elongation and lower modulus of elasticity at higher temperatures. This happens not only to exposed, but also to covered geomembrane systems.

Geomembranes are alternatively stretched and slackened in hot climates. This may cause ripples, decrease the friction between the geomembrane and the sub-base, and create tensile stresses at the seams. The problem is of special concern at the reservoir fluctuation levels and at dams that are periodically drawn down so that the reservoir does not provide a sufficient thermal barrier. Thermal shock resulting from draw down may increase risk of stress cracking in susceptible geomembranes such as those in HDPE. Influence by heat must be considered when choosing materials to suit specific site conditions, and in the design of the sealing system.

The susceptibility to heat does not concern geomembranes with low coefficient of thermal expansion (such as PVC), but mainly those geomembranes that have a high coefficient of thermal expansion, like HDPE geomembranes. Geocomposites formed by a geomembrane heat-coupled to a geotextile are the best performing with respect to thermal stability. Also scrim reinforcement can be beneficial in reducing dilation and expansion.

In areas of strong sun exposure, greater care should be used when installing thermoplastic geomembranes because the formation of waves, wrinkles and ripples prevent the proper installation of the cover layer.

3.3.2. Ultra Violet radiation

All synthetic materials, due to their organic nature, suffer from the degradation processes caused by the ultraviolet radiation coming from the sun, as ultra violet radiation can destroy the molecular structure of the geomembrane. Generally, in all materials the degradation is detected by decreased elongation at break, by decreased resistance to low temperatures, to dynamic impact, to static puncture, by decreased shear resistance at joints as a consequence of the higher rigidity in the material, etc. Generally, the biggest decrease in the content of plasticisers is detected in PVC geomembranes. It has been proven that standard geomembranes manufactured with plasticisers of high quality and good absorbents of light (UV) behave better in the area always exposed to the radiation, rather than in the area of fluctuating water level or in the area always submerged in water. The reason could be explained by the loss of these additives due to two phenomena: migration – the most common – and extraction. If plasticisers are of good quality, extraction (which is encouraged by the action of water) prevails over migration. For application in hydraulic works, proper plasticisers shall be selected for resistance to water when submerged.

Ultra violet damage can be lessened by proper geomembrane formulation with UV resistant additives. Case histories of PVC geomembranes with UV protective additives exposed for more than 30 years testify good resistance to UV. Thicker geomembranes provide better performance because of the greater mass of additives.

In the north hemisphere the action of UV radiation becomes more patent in the north bank of the reservoirs, that is to say the one directed toward the equator; this fact is proven in all thermoplastic materials.

A cover layer can eliminate any concern in particularly aggressive environments. The cover layer may be a sacrifice geomembrane.

3.3.3. Water ingredients

The need to ensure compatibility between the GSS materials and accidental pollutants in the reservoir and the catchment area, like hydrocarbons or humus acid from organic material, is a minor point of concern for geomembranes. It is necessary however to mention that the action of water contaminated by certain hydrocarbons can considerably affect the geomembranes of the thermoset type of Table 3.

Water ingredients in tailings and waste water reservoirs may create severe problems and have to be considered separately depending on their ingredients. It should also not be forgotten that waters containing alkalis or tenso-active substances (case of recycled waters) can favour the “stress-cracking” phenomenon in PE geomembranes.

Solvents and adhesives, which are more sensitive to contaminants in the reservoir water, are no longer used for seaming.

3.3.4. Biological action (micro-organisms)

Potentially aggressive micro-organisms may pre-exist in the fill and foundation or develop in the reservoir. The possibility of growing of micro-organisms on the geomembrane exists, although it will not decrease the properties and function of the geomembrane but may affect the appearance of the surface. Nevertheless, it should always be considered.

Resistance to micro-organisms may be given by additional additives. Their quality and quantity shall relate to the quality of the stored water.

Isolated cases have been detected where the action of certain micro-organisms has become apparent in the surface of the sheet with some characteristic stains, and have led to a remarkable decrease in the mechanical characteristics. The content of the plasticisers in the PVC was not affected.

3.3.5. Vegetation

The resistance of geomembranes to growth of vegetation is not dissimilar to that of other materials like bituminous concrete or concrete. Polymeric geomembranes are more resistant than bituminous geomembranes. Vegetation growth is generally only applicable to earthfill dams and dam abutments.

In GSS installed for a long time and where aging has taken place, certain types of vegetation have been able to perforate the geomembrane; although initially the geomembranes complied with the standard of roots resistance. Bituminous geomembranes are less resistant to this type of pathology.

3.3.6. Fauna

As far as it is known, rodents have rarely attacked a geomembrane on a water retaining structure. In fact, rodents will only try to penetrate a geomembrane if they are trapped underneath, or if there is food on the other side.

In certain situations, rodents are able to attack geomembranes (thermoplastic and thermoset alike), if they are homogeneous, that is to say without reinforcement.



Fig. 36
Growth of vegetation on bituminous geomembrane (ultimate condition)

The insertion of glass fibres or a geotextile as backing usually overcomes the action of these animals.

Other types of fauna that may cause problems to the geomembranes are mainly foxes, which are able to perforate the sheet and to lift the geotextile off its supporting layer with their claws.

3.3.7. Vandalism

Vandalism is relevant mainly to exposed geomembranes and is such an unavoidable and unpredictable occurrence, which can manifest itself in so many variable ways, that it is complicated to control, to quantify and to describe all types of occurrence. The actions of vandalism are so varied that they range from throwing objects (stones, wood, tires) to disposing of stolen cars. One of the most common actions is to force the access to the reservoir and to use it as a swimming pool, a skating zone, a zone for motorcycling, or as a hunting or fishing area, with the normal detrimental impacts of these activities. Stealing of geomembranes for other purposes such as roofing in poor areas is also a possibility.

The parts accessible by land by the casual vandal can be protected by physical barriers (fencing) and/or surveillance. Access by boat, or vandalism caused by shooting, are type of vandalism less likely to happen. If vandalism is a particular concern, it can be counteracted by a cover layer on the accessible parts of the geomembrane. Heavy cover (concrete), or light cover (shotcrete, steel plates, steel cables) can be considered.

An exposed geomembrane can be subject to vandalism if access exists. In this situation, it is also possible to make an easy and quick repair at very low cost. The cost of installation of a cover layer just because of vandalism may not be justified.

4. GEOMEMBRANES FOR NEW CONSTRUCTION AND REHABILITATION OF FILL DAMS

The enclosed data base reports a total of 183 fill dams with a geomembrane sealing system (GSS), and for more than 150 dams out of the total of 183 dams, more detailed information is available. This chapter discusses jointly the application of upstream geomembranes in the construction and rehabilitation of fill dams, as the design principles and the installation techniques are quite similar.

GSS with the geomembrane in an internal position, which exist on 20 out of a total of the 174 dams for which the position of the geomembrane is known, are briefly reported at the end of the chapter, before the sections on placement.

4.1. GENERAL

In fill dams, watertightness is provided by a material different from the dam body. The barrier to water infiltration has traditionally been made with natural or with man-made materials, to construct either an impervious core as in Asphalt Concrete Core (ACC) and Clay Core dams, or an impervious upstream face as in Concrete Faced Rockfill Dams (CFRD) or asphalt concrete facings. Artificial sealing materials such as geomembranes and geocomposites are a relatively new and alternative solution in itself, which may become the only option in cases where natural dam sealing material is either missing, inappropriate, expensive or difficult in supply and/or installation. The geomembrane forms the impervious element of the dam, and all considerations to drainage, uplift, stability, etc. which are applicable when designing a waterproofing system (Clay Core, Asphalt Concrete Core, CFRD, etc.) are also applicable to the geomembrane. What is specific to the geomembrane is only the layers immediately below and above it. In all cases, as with any other waterproofing material, the design of the GSS must be made in conjunction with the overall design, stability and safety of the dam.

The geomembrane sealing system can be installed according to the:

- Upstream system, divided into exposed and covered;
- Internal system.

4.1.1. The upstream system

The most frequently adopted solution is the “upstream system” where the geomembrane is placed on the upstream face of the fill dam, either exposed or covered.

In the upstream system the entire dead weight of the fill supports the hydraulic head, the water weight of the reservoir stabilises the upstream part of the dam, there is no pore water pressure or seepage pressure in the entire dam body to be considered in the design: the upstream system maximises the safety of the structure as it provides the maximum stability of the dam because of the absence of excess pore pressures in the dam fill.

Table 23
Reported uses of geomembranes in fill dams*

	Total	Upstream		Internal
		Upstream Exposed	Upstream Covered	
Total number of fill dams	174	47**	106	20
Total number of new construction	103	22	66	15
Total number of rehabilitation	56	21	31	5
Unknown if new construction or rehabilitation	14	5	9	0

*The numbers reported in the table refer to fill dams for which position of the geomembrane is known. For other additional 9 fill dams surveyed (in total 183 fill dams) the position of the geomembrane is not reported. The table includes 43 dams in China, and 5 tailings dams.

**Including 1 dam where the geomembrane is exposed only partially.

An upstream geomembrane sealing can significantly reduce the construction schedule. Its installation is only marginally influenced by weather conditions. Installation can be staged so that it can follow and accommodate the construction schedule of the dam body, allowing faster construction times. For example, the geomembrane can be installed on the lower part of the dam while placement of filling is ongoing in the upper part. Obviously additional fastening shall be provided and utmost care against risks of stones falling from the upper part. The associated benefit is the provision of early watertightness to the lower part of the dam, thereby reducing the demands on the temporary works (height of cofferdam, diversion tunnel).

As the geomembrane sealing system is placed by specialized contractors, a high quality can be achieved.

Besides the savings associated with the materials of a geomembrane system, less construction time is needed in comparison with, for example, a concrete face slab. Some examples of the upstream system are Bovilla (Albania), Figari (France), Jibiya (Nigeria), La Galaube (France), Ospedale (France), Contrada Sabetta (Italy).

During operation, the upstream position of the geomembrane sealing system allows for technically practical and cost effective repair. This will include the cost of removing the cover layer in the case of a covered geomembrane.

The disadvantage of the “upstream system” is that the upstream sealing area is larger than the area of the vertical cross section of the valley, it is subject to the external loads, and often requires to be stabilised by anchoring or ballasting.

The advantage of the “upstream system” is that it allows access to the sealing system for repair or replacement. Easy access depends on whether the geomembrane is exposed or there is a cover layer.

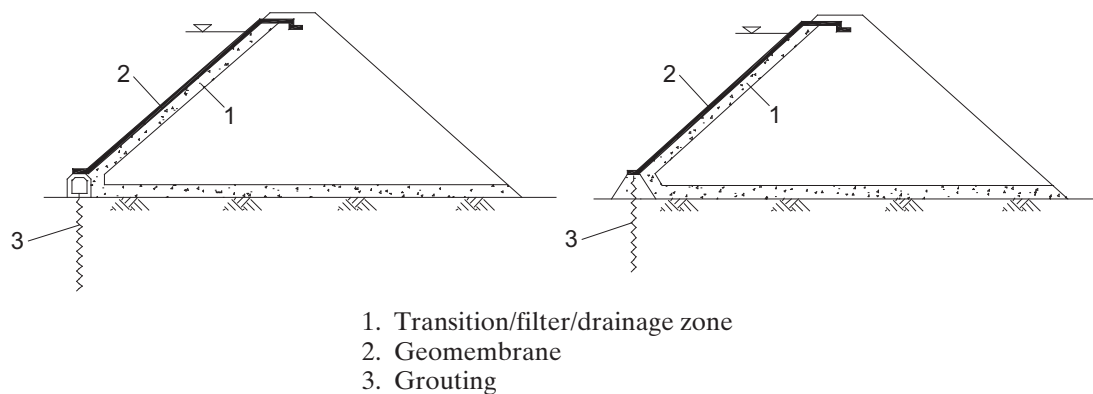
The upstream system allows for two main groups of geomembrane sealing systems:

- The exposed geomembrane systems,
- The covered geomembrane systems.

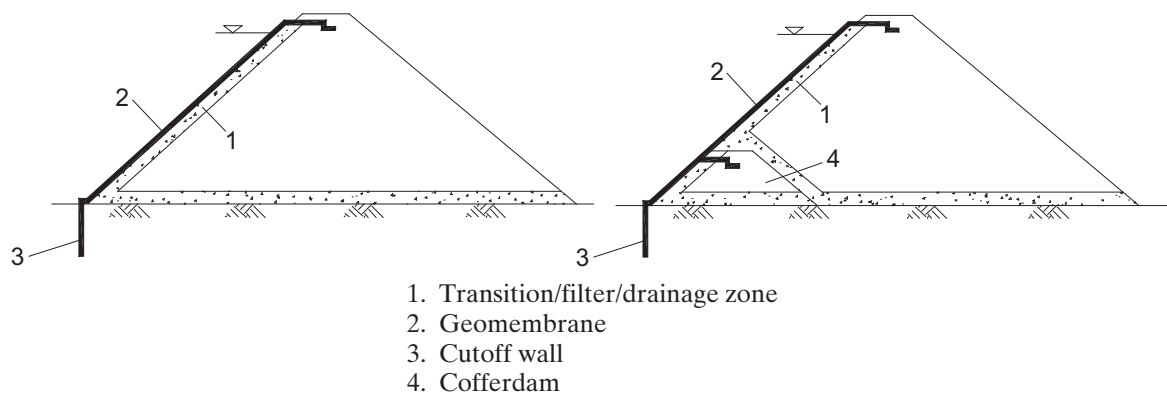
In both exposed and covered alternatives the principal requirements of the geomembrane sealing system are:

- Watertightness provided by the geomembrane,
- Its tight connection with the dam foundation and any concrete structure attached to or penetrating the sealing,
- Elasticity to adjust to deformation in the dam body, due to settlement,
- Bridging of structural joints,
- Anchoring system to keep the geomembrane in place (anchorage or ballast),
- Provision of drainage behind the geomembrane to capture any leakage water through the sealing, to avoid uplift and to monitor watertightness of the sealing.

The upstream system has been applied in a variety of configurations and conditions, as conceptually illustrated in the following Fig. 37 and Table 24. Combinations of the alternatives have also been applied.



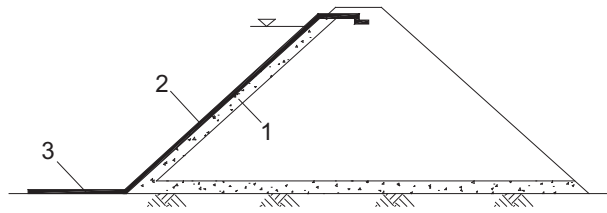
a) Geomembrane connected to the grout curtain. Examples : Moravka (Czech Republic), Winscar (UK), Bovilla (Albania)



b) Geomembrane connected to the cutoff. Example: Symvoulos (GM anchored on concrete cut off trench, Cyprus), Jibiya (GM anchored to a self-hardening cut-off, Nigeria)

Fig. 37
Upstream exposed geomembranes in fill dams

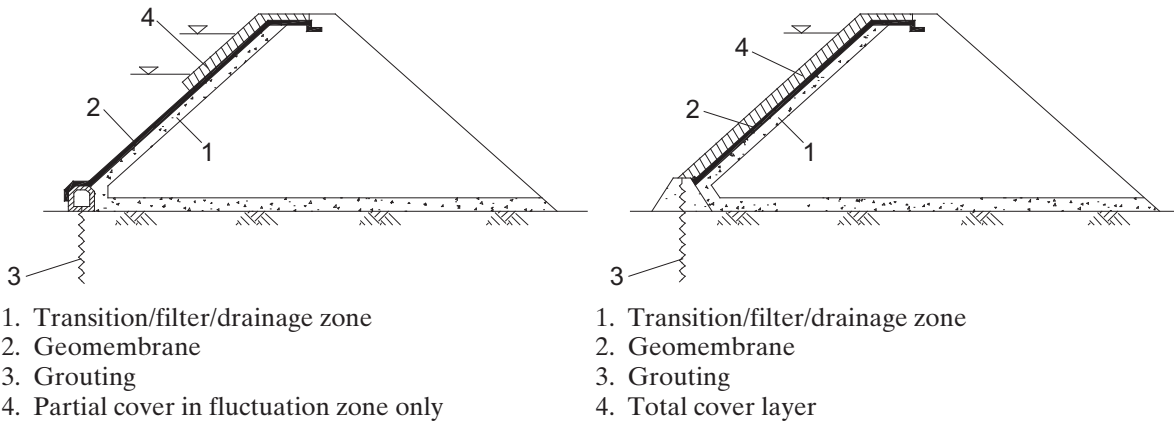
Fig. 37 (suite)



1. Transition/filter/drainage zone
2. Geomembrane
3. Upstream sealing geomembrane blanket

c) Geomembrane extended upstream on bottom of reservoir. Examples: Pian del Gorghiglio (Italy), Kyjiche Ujezd (Czech Republic), Goronyo (Nigeria, secondary dam)

All systems of Fig. 37 can be installed with exposed geomembrane or with covered geomembrane.



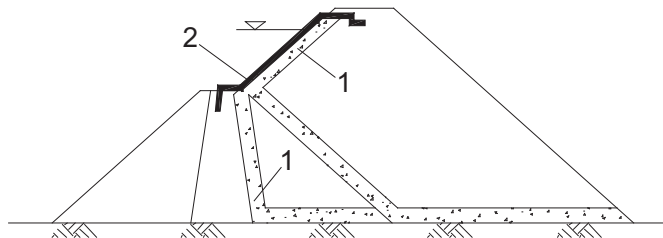
1. Transition/filter/drainage zone
2. Geomembrane
3. Grouting
4. Partial cover in fluctuation zone only

1. Transition/filter/drainage zone
2. Geomembrane
3. Grouting
4. Total cover layer

Fig. 38

Upstream covered geomembranes in fill dams

The above systems are appropriate for construction in stages (cofferdams embedded in the main dam, tailings dams) and to heightening of dams. Examples: Cerro do Lobo (Portugal), Cowarra Creek and Cracow (Australia), Lindley Wood (UK).



1. Transition/filter/drainage zone
2. Geomembrane

Fig. 39

Upstream geomembranes in heightening of fill dams with clay core

Geomembrane exposed or covered may have different properties, as the requirements for an exposed application are more demanding.

4.1.1.1. Exposed geomembrane system

At the time of publication of Bulletin 78 in 1991, the covered geomembrane system was mentioned as the state of the art system for fill dams. The bulletin considered exposed geomembranes in fill dams as a possible evolution, in case they could be anchored to a rigid support.

Based on the use of geomembranes in concrete dams, geomembranes have undergone substantial developments with the resin and the additives, which guarantee a high UV-resistance. An exposed geomembrane is a credible option for a fill dam. At present, both exposed and covered systems are used in fill dams (47 exposed, 106 covered, 20 central).



Fig. 40

Moravka, Czech Republic, 1999. Rehabilitation of asphalt concrete facing, 25 400 m². Exposed 2.5 mm thick PVC geocomposite anchored by tensioning lines resisted the 500 years flood. Rate of leakage is < 2 l/s

Table 24

Reported installations of upstream geomembranes on fill dams*

Upstream System Only	TOTAL Exposed + Covered + Central	Exposed	Covered
Installation	174	47	106
Largest installation [m ²]	165 000	30 000**	165 000***
Highest dam [m]	101 (Salt Springs, USA), full dam 198 (Karahnjukar, Iceland), toe wall and horizontal joint	101 (Salt Springs, USA)	91 (Bovilla, Albania), full dam 198 (Karahnjukar, Iceland), toe wall and horizontal joint
Oldest installation was in year	1959 (Contrada Sabetta, Italy)	1973 (Banegon, France)	1959 (Contrada Sabetta, Italy)

* In situ membranes are not included.

** On dam only. Installation where the geomembrane was extended as a blanket on bottom of reservoir account for a maximum of 120 000 m².

*** On dam only. Installation where the geomembrane was extended as a blanket on bottom of reservoir account for a maximum of 1 200 000 m².

In new construction, the advantages of an exposed geomembrane system include easier construction of the dam body and installation of the sealing system, easy access for repair to the sealing geomembrane in the event of unforeseen leakage, the possibility of visual inspection of the geomembrane, and lower construction costs. In rehabilitation, the use of an exposed geomembrane system offers the advantage of a shorter out-of-service time.

The disadvantage of the exposed geomembrane system is that the durability of the geomembrane is less due to the environmental agents, including UV rays. The system can be mechanically damaged by vandalism, ice effects, and by sharp objects dropped from the crest and the dam abutments. If not properly designed, exposed geomembranes are subject to the uplift forces by wind and waves.

In order to keep the exposed geomembrane in place on the dam surface, it is necessary to anchor the geomembrane to the periphery and to the surface.

4.1.1.2. Covered geomembrane system

The covered geomembrane system is selected when the above possible causes of damage to the geomembrane are a significant concern, and when the increased durability of the geomembrane justifies the cost of the cover layer.

Table 25
Comparison of upstream geomembrane systems

	Upstream Exposed	Upstream Covered
Risk of damage during construction	Low	High
Risk of damage during operation by ice	Low to medium, depending on robustness of geomembrane*	None
Risk of damage during operation by floating debris (including ice slabs)	Low*	None
Risk of damage during operation by falling weights from the abutments	Low	None
Risk of damage to the cover	Not applicable	Medium
Risk of vandalism	High	Minimum
Reported cases of vandalism	None	None
Visual inspection	Possible	Not possible
Cost of inspection	Very low	Medium to high
Possibility of repair in the dry	Easy	Complicated
Cost of repair	Low	Medium to high
Possibility of repair underwater	Easy	Complicated
Durability	High	Extremely high
Installation of GSS and impact on the whole construction schedule	Low	High
Cost (including cover layer)	Low	High

* A test section to ascertain resistance to heavy prolonged aggression by ice was made at Toulmoustouc CFRD, Canada, in 2004.

Examples of resistance to ice: Moravka (Czech Republic 1999), Midtbotnvatn (Norway 2004), Salt Springs (USA 2004).

Advantages of the covered geomembrane system are that the geomembrane is uniformly kept in position by the load of the cover layer, and is protected against external agents.



Fig. 41 and 42

Moravka, Czech Republic: ice has not damaged the exposed geomembrane installed in 1999

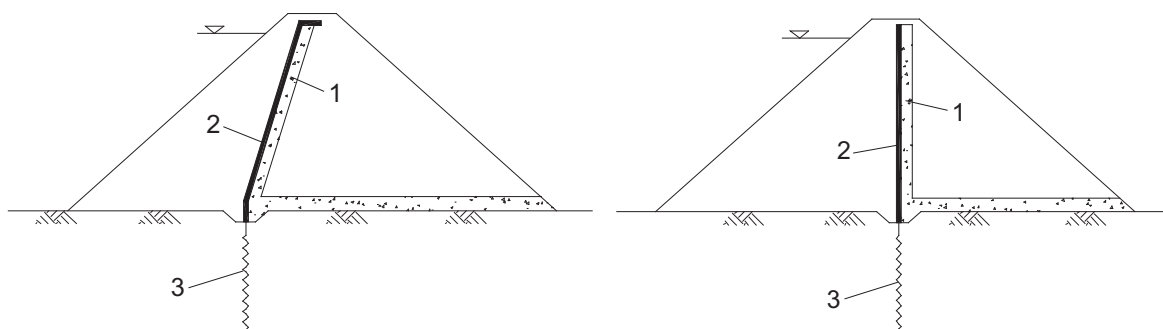
Disadvantages are the risks associated with placement of the cover, the non-accessibility of the geomembrane for inspection and repair work, and the higher construction costs caused by the cover layer. This cost has to be compared with the cost of face anchorage in the case of an exposed geomembrane.

Partial cover may also be considered, in particular for leisure installations (Mauriac and Mas d'Armand, France), where cover may be required at the crest.

Comparison of advantages and disadvantages of the exposed and covered upstream system are summarised in the table 24, which is based on the findings of the database.

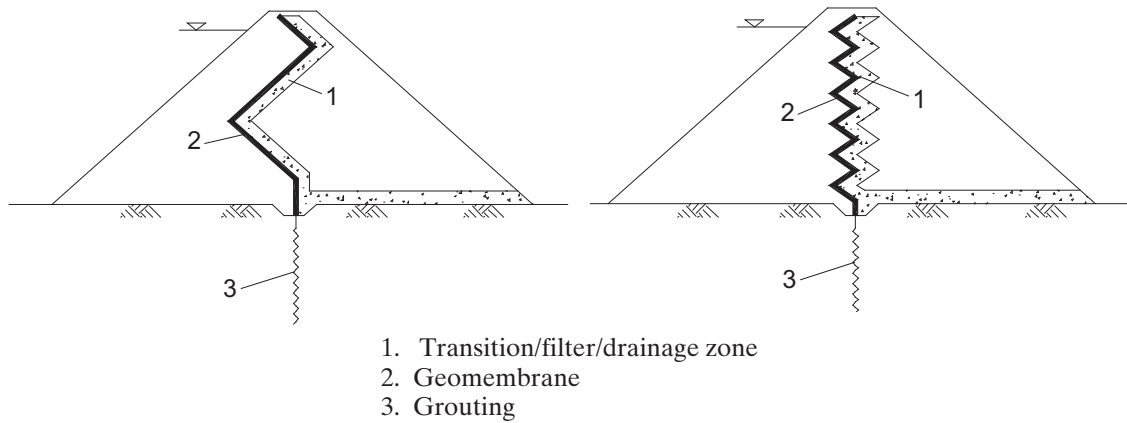
4.1.2. The internal system

The new construction of dams provides the possibility of installing the geomembrane seal inside the dam fill. The internal installation of the geomembrane seal would only be used in particular circumstances such as cases of semi-permeable to very low permeability materials.



1. Transition/filter/drainage zone
2. Geomembrane
3. Grouting

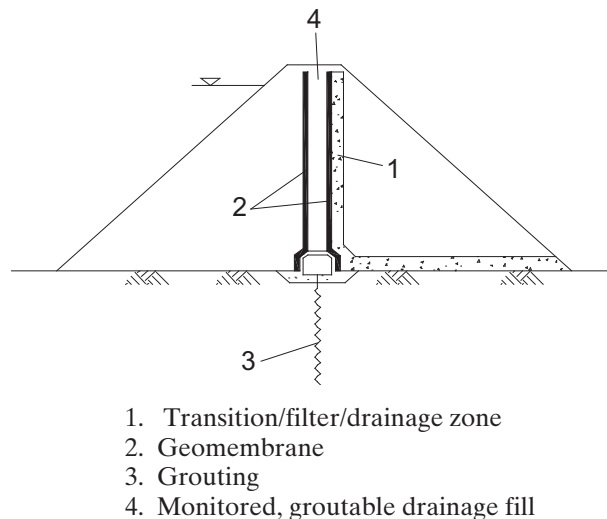
- a) Geomembrane in inclined position. Example: Valence d'Albi (France)
- b) Geomembrane in vertical position. Example: Atbashinsk (Kirgizstan)



c) Geomembrane in zig-zag

d) Geomembrane in zig-zag

The two configurations are conceptually identical, the only difference being the height of the lifts. Examples: Fencheng and Wantuzhou (China).



e) Possible future evolution: double geomembrane with drainage monitoring layer and groutable intermediate layer.

Fig. 43
Internal geomembranes in fill dams

Internal geomembrane sealing systems have been used in a limited number of cases (20 cases over a total of 174 dams in which the position of the geomembrane is known, out of the total 183 fill dams with a geomembrane). Much detailed information has not been provided in the technical forms used to fill the data base. It is suggested that the application of the internal system to very high dams is studied with particular care, especially in terms of connection to the grout curtain, connection of the zigzag to the abutments (case c), and excessive stresses on the geomembrane folds.

In construction of new dams with a central core, geomembranes are a reliable alternative to conventional clay core or asphalt concrete core.

The advantage of the “internal system” is the protection of the geomembrane against external mechanical, physical, biological and chemical loading. The

geomembrane is kept in position by the dam fill. The quantity of geomembrane installed is less compared to the upstream option. Disadvantages are the risks associated with placement of the upstream and downstream fill. Recent techniques now allow for monitoring of the efficiency of the geomembrane and provision, at the time of construction, of higher permeability layers immediately downstream of the geomembrane. An internal geomembrane entails a more complex zoning of the fill, common to all central core solutions.

The internal system has been adopted in a variety of configurations and constructional alternatives, as conceptually illustrated in Fig. 43, in which configuration e) represents an evolution proposed but not yet adopted.

Unfortunately the authors have no data about the behaviour in the time of these schemes and opportunities or difficulties during installation.

The detailed design for the central position of geomembrane shall address the difficulties in the geometry to connect the zigzag to the straight line of the grouting at the abutments. Also consideration should be given to avoid excessive stresses on the folds of the geomembrane.

The internal system is applicable also to raising the height of existing dams.

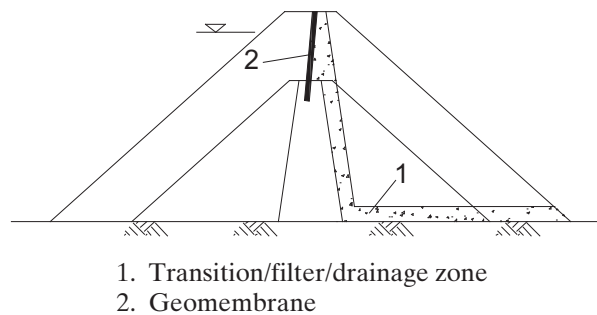


Fig. 44
Internal geomembranes in heightening of fill dams with clay core

4.2. LOADING

The layout of the geomembrane system and the selection of the various materials of the system have to take into account the requirements and loading conditions specific to the system on the dam surface or inside the dam body respectively.

In the case of the covered geomembrane system, the facing system comprises at least one thin layer on top of the dam structure, i.e. the geomembrane. There may be other layers, such as geotextile layers below and/or above the geomembrane, or geonets or geospacers as a drainage layer, that may or may not be associated with the geomembrane.

These thin layers are considered as two-dimensional interface structures characterised by:

- Stress deformation properties in the plane of the layer, which are usually non linear, anisotropic and for some materials time-dependent (creep);
- A stress deformation relationship at each interface which is in particular governed by:
 - Skin friction of the materials in contact with each other;
 - Moisture content;

- Water pressure;
- Negligible resistance to bending.

Stability against sliding must be checked at every interface between two adjacent thin layers, between the supporting layer or dam surface and the geomembrane, between the geomembrane and the cover layer. The stability of the cover layer (interface cover layer / protection geotextile, and interfaces between cover layers if any) must also be carefully assessed. If sliding occurs on any interface, there is a risk that the geomembrane is subject to excessive tensile stresses and torn. Some French experiences, with slopes $>1V:3H$, have shown some difficulties and/or need for textured materials with higher friction value.

In fill dams, when the facing system includes a cover layer, while the deformations of the facing system can usually be analysed without considering the tensile strength of the thin layers, their interface friction resistance can affect the overall performance of the system because the thin layers may act as preferential slip surfaces liable to be critical for the stability of the system. Increase in the interface resistance and appropriate anchorage must be provided. The friction of the interface between the geomembrane upstream face and the geosynthetic layer placed over the geomembrane (general case) must be the lowest of the whole GSS in order that displacements (compaction, movement of machinery, etc.) and the tangential component of the weight of the cover structure do not cause more tensile stresses in the geomembrane. It is recommended that the geomembrane is placed with the face with least friction uppermost. The face with the higher friction would be placed on the lower surface or support layer. For example the lower face for a bituminous geomembrane will be the sandy face, and for a PVC geomembrane bonded with a geotextile, the lower face will be the one with the geotextile. This point is detailed and explained by the following example, related to a covered geomembrane system.

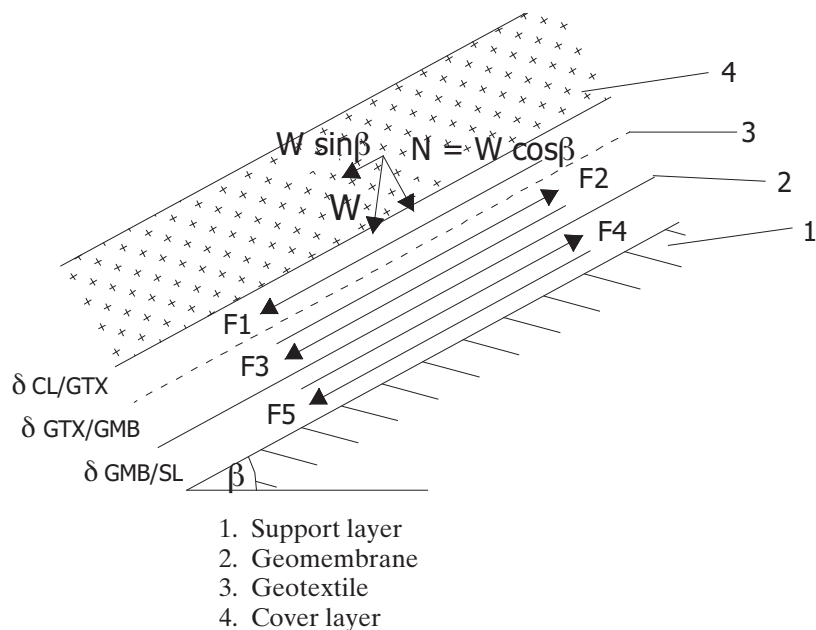


Fig. 45
Analysis of forces in an upstream covered GSS (Koerner)

In a simple way, the main parameters involved in the calculation of tension forces in the various geosynthetics of a GSS are the friction angles of the interfaces; the friction angle between two materials allows calculating the shear resistance along the concerned interface:

$$\tau = (\sigma - u) \tan \delta, \text{ (} u = \text{water pressure at the interface; } u = 0 \text{ for the example here)}$$

The forces involved in the GSS given as an example (Fig. 45) are:

- The driving force, parallel to the slope, is $W \sin \beta$, with W the weight of the cover layer and β the slope angle
- This force may induce tension forces in the geosynthetics
- F_1 - F_2 = Tension force in the geotextile
- F_3 - F_4 = Tension force in the geomembrane

with:

- $F_1 = N \tan \delta_{CL/GTX}$
- $F_2 = N \tan \delta_{GTX/GMB}$ and F_3 the equal and opposite force to F_2
- $F_4 = N \tan \delta_{GMB/SL}$ and F_5 the equal and opposite force to F_4
- $\delta_{CL/GTX}$ = friction angle along cover layer / geotextile interface
- $\delta_{GTX/GMB}$ = friction angle along geotextile / geomembrane interface
- $\delta_{GMB/SL}$ = friction angle along geomembrane / support layer interface.

If $F_4 > F_3$, which is equivalent to $\delta_{GMB/SL} > \delta_{GTX/GMB}$ and corresponds to the case of the less resistant interface placed above the geomembrane, there is no tension in the geomembrane. In any case, all friction angles must be $> \beta$.

In this example, note that the deformations and displacements are not taken into consideration. If friction is not sufficient to ensure the stability of the cover structure, anchor and/or buttress systems must be incorporated.

The inclined plane test (Standard EN ISO 12957-2, 2004) is appropriate for friction measurement under low normal stress as found in a cover layer; this test is complementary to shear boxes which are more appropriate to higher stress situations.

4.3. THE UPSTREAM SYSTEM

4.3.1. General

The following main principles have to be considered for an upstream geomembrane sealing system:

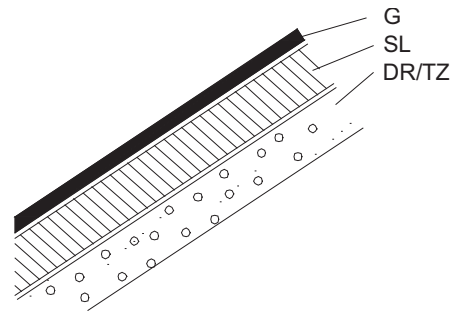
- The geomembrane has to be protected against damage by puncturing caused by rough contact layers. Protection can be provided by a protective geotextile,
- A support layer has to be provided beneath the geomembrane with suitable imperviousness characteristics to reduce seepage flow in the event of a leak,

- Adequate free drainage must be provided beneath the geomembrane and the buffer to avoid hydraulic pressure build up, in the event of a leak.

The principles are the same for all fill dams. The layer between the geomembrane seal and the dam fill shall have:

- Permeability characteristics such that uplift pressure is precluded
- Grain size distribution such that filter criteria are respected.

The details of the geomembrane sealing system depend on the type of application.



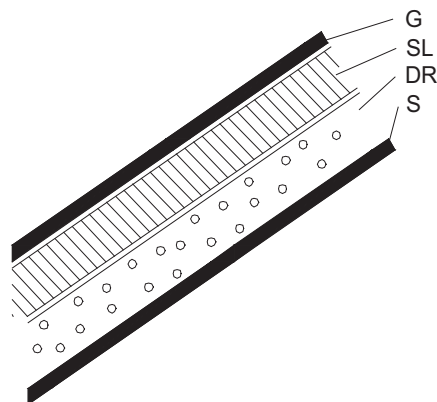
- | | |
|-------|---|
| G | Geomembrane (optionally laminated to a protective geotextile) |
| SL | Supporting layer |
| DR/TZ | Drainage layer/Transition Zone |

Fig. 46

Stratigraphy of the GSS in case of new construction

DR/TZ varies depending on type of dam. In low permeability earthfill dams and semi-pervious sand-gravel fill dams, there must be a drainage layer, while in pervious rockfill dams the transition zone can act as a drainage layer for the GSS.

In the case of rehabilitation at a dam with a failed surface sealing system, the GSS is installed over a surface that originally had low permeability (concrete, asphalt concrete), but having deteriorated the old system is adequately permeable. The drainage layer varies depending to the extent of the deterioration of the old sealing system. If a new GSS is required it is because the existing layer is deficient thus it works as a drainage layer itself.



- | | |
|----|---|
| G | Geomembrane (optionally laminated to a protective geotextile) |
| SL | Supporting layer |
| DR | Drainage layer |
| S | Existing surface sealing |

Fig. 47

Layering of the GSS in case of rehabilitation

DR can be a synthetic material such as a geodrain or geospacer.

There is no theoretical limit in slope inclination for the geomembrane sealing system on fill dams. The limit is provided by the capability to place a supporting layer without segregation. Exposed GSS rest on the slope by friction and by additional anchorage systems, while covered GSS are kept in place by the ballasting layer.

The following examples detail the function and materials for all layers, and apply to exposed and covered systems. Table 26 provides an example of suitable materials (C2 and C3 may be replaced by concrete slabs, S1 or S2 may be not necessary,...), to give a better understanding of the GSS.

Example 1: Case of a new earth dam. See Table 26 for function and type of layers.

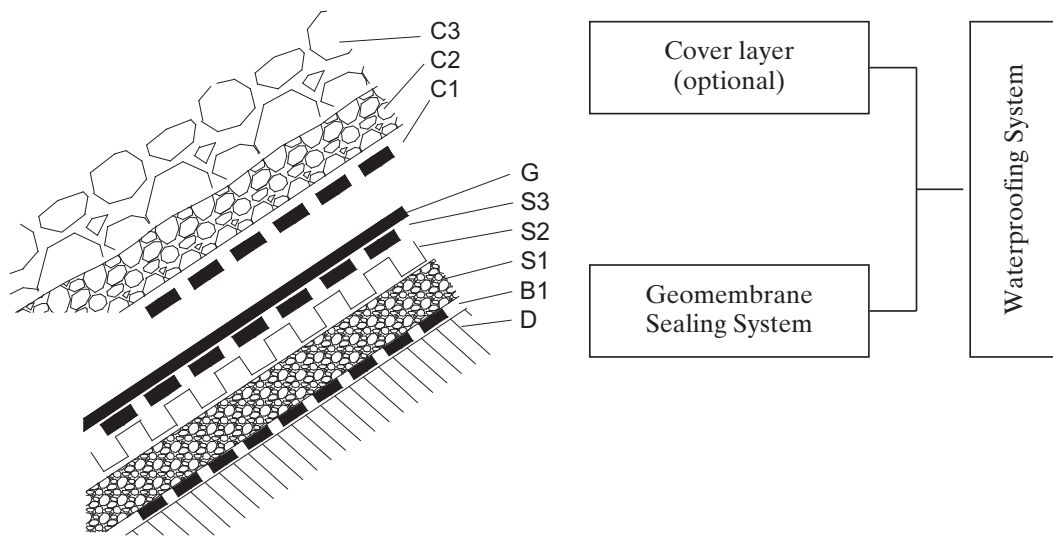


Fig. 48
New earthfill dam
D: dam body

Table 26
Function and type of the various layers

Number	Function	Material
C3	Mechanical protection	Rip-rap, concrete
C2	Transition	Granular (0/25)
C1	Anti-puncturing	Thick geotextile
G	Watertightness	Geomembrane
S3	Anti-puncturing	Thick geotextile
S2	Drainage	Soil drain or Geospacer
S1	Drainage, support	Granular (0/25 mm)
B1	Filtration	Geotextile

The books “Recommandations pour l’utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets (CFG)” (Fascicule No. 11 – CFG 1195) and “Designing with Geosynthetics” (R.M. Koerner 2005) are a good examples of design by functions.

Fig. 48 gives just an example to illustrate the design by functions (C2 and C3 may be replaced by concrete slabs as in this example, S1 or S2 may be not necessary,...)

Example 2: New rockfill dam with covered geomembrane.

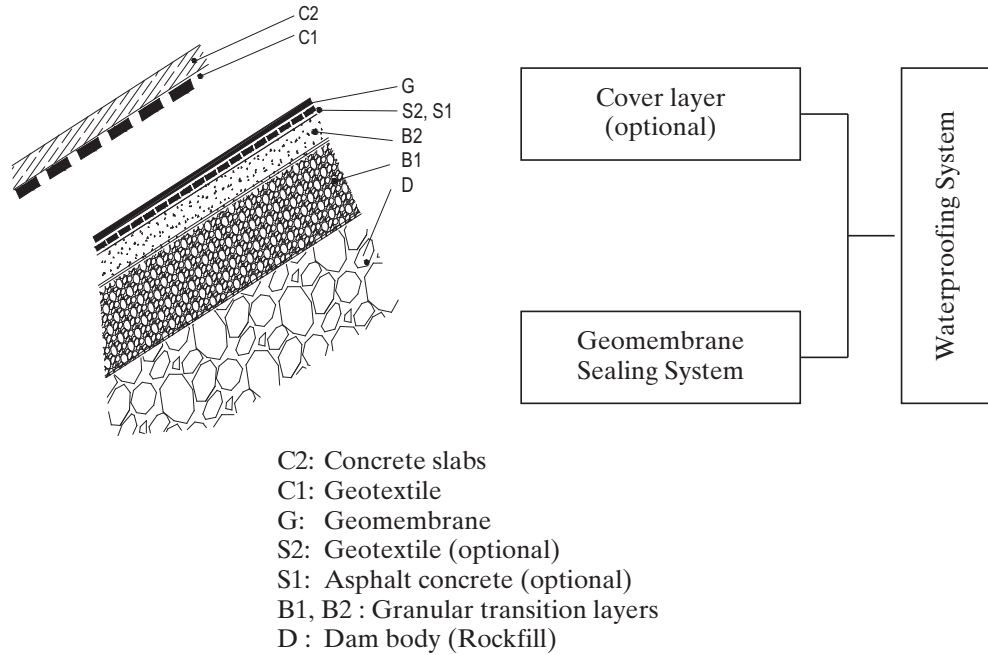


Fig. 49
 New rockfill dam

Exemple 3: Rehabilitation of a concrete face rockfill dam with covered geomembrane.

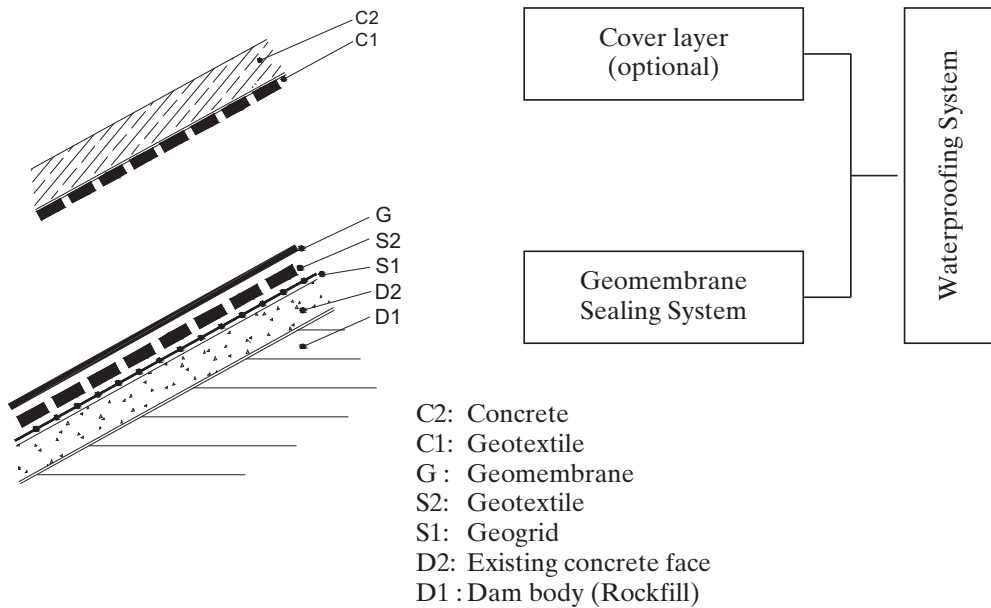


Fig. 50
 Rehabilitation of rockfill dam

In the example of Fig. 50, there are fewer layers because the need for antipuncturing protection is less. As in example 1, a drainage layer has to be provided under the geomembrane. Being rehabilitation, it may be assumed that the old existing facing is leaking and therefore sufficiently permeable. If not, an additional drainage layer should be introduced.

4.3.2. Geomembrane sealing layer

The geomembrane sealing layer is formed by single geomembrane sheets of variable width, depending on the manufacture, which are seamed together to form a continuous plane sealing geomembrane on the surface. According to the database the most common geomembranes for fill dams are thermoplastic polymers such as PVC (about 49 %) and LLDPE (about 16 %), but may also be elastomeric. Bituminous geomembranes have been used mainly in France. PVC geomembranes are the most frequently used for exposed installation (about 56 %), see Table 27).

Table 27
Types of geomembranes in fill dams*

Type of GM	Dams	% on total	Tot exposed	Tot covered**	Unknown
PVC	83	48.5	23	57	3
LLDPE	27	15.8	0	26	1
Prefabricated bituminous	20	11.7	7	13	0
HDPE	15	8.8	3	11	1
Elastomeric	11	6.4	5	4	2
CSPE	7	4.1	3	4	0
PP	6	3.5	3	3	0
CPE	2	1.2	0	2	0
Total known	171	100.0	44	120	7

* In situ liners adopted in old installations include 9 dams with polymeric solutions and 3 dams with bituminous solution.

** Including central geomembranes.

Geomembranes with high coefficient of thermal expansion are not recommended for exposed application.

High elasticity, measured in 3 dimensions, and a high value of yield point are very important properties for the geomembrane. In fact they govern the capability of the geomembrane to conform to the substrate and to adjust to displacement in case of a seismic event.

To provide some indications on values, we list below the characteristics of PVC and bituminous geomembranes installed on 3 fill dams, 2 of which of comparable height (ca. 40 m) and one higher (ca. 90 m).

Table 28
Characteristics of some geomembranes installed on fill dams

Dam	Height [m]	Support layer	Cover layer	GM	Characteristics	Values*	Test method
Bovilla (new constr.)	91	Gravel stabilized with cement	Cast-in-place concrete slabs	PVC-P	– Thickness – Specific gravity – Tensile strength – Elongation at break – Tear resistance – Puncture resistance	3 mm 1.30 g/cm ³ ≥ 27 KN/m ≥ 230 % ≥ 380 N ≥ 1 550 mm	ASTM D 1593-UNI 8202/ 6 ASTM D 792 - UNI 7092 UNI 8202/8 - DIN 16726 ASTM D882 DIN 53363 DIN 16726
Winscar (rehab.)	52	Asphalt concrete	None	PVC-P	– Thickness – Specific gravity – Tensile strength – Elongation at break – Tear resistance – Puncture resistance	2.5 mm 1.30 g/cm ³ ≥ 25 KN/m ≥ 230 % ≥ 350 N ≥ 1 500 mm	ASTM D 1593-UNI 8202/ 6 ASTM D 792 - UNI 7092 UNI 8202/8 - DIN 16726 par.5.6.1. Table 1 - A - VII DIN 53363 DIN 16726
La Galaube (new constr.)	43	Cold asphalt concrete	Cast-in-place concrete slabs	Bitum.	– Thickness – MPUA – Tensile strength – Elongation at break – Puncture resistance	4.8 mm 5.5 kg/m ² ≥ 25 kN/m ≥ 60% ≥ 500 N	NF P 84.512/1 NF P 84.514 NF P 84.501 NF P 84.501 NF P 84.507

* Tolerances are not listed

4.3.3. Supporting layer

The purpose of the supporting layer is to form a regular and stable base for the sealing system. The supporting layer shall provide sufficient bearing capacity and stability. The gradation of the supporting layer shall be such that it can control the flow of water through the leaking geomembrane. Nevertheless, it should be

sufficiently pervious as to preclude uplift due to a leak of the geomembrane, or to vapour and air pressure between the geomembrane and the supporting layer.

The supporting layer shall be stable on the fill, and the friction resistance of the interface between its top surface and the geomembrane must provide sufficient stability of the geomembrane, with or without the cover layer.

The supporting layer shall also provide an adequate surface for installation of the geomembrane. For this purpose, the surface of the supporting layer shall be proven with specific tests not to damage the geomembrane even under hydrostatic service load. A factor of safety of 1.5 is suggested.

Selection of the supporting layer depends on the geomembrane as well as on the size and characteristics of the layer beneath, and on the dam slope. In new dams, the supporting layer may be sand and gravel stabilized with cement or bitumen if necessary. The suggested material is a graded rounded material in the range of 5 to 25 mm. To minimise the risk of damaging the geomembrane by puncture, an optional geotextile attached to the geomembrane can be adopted.

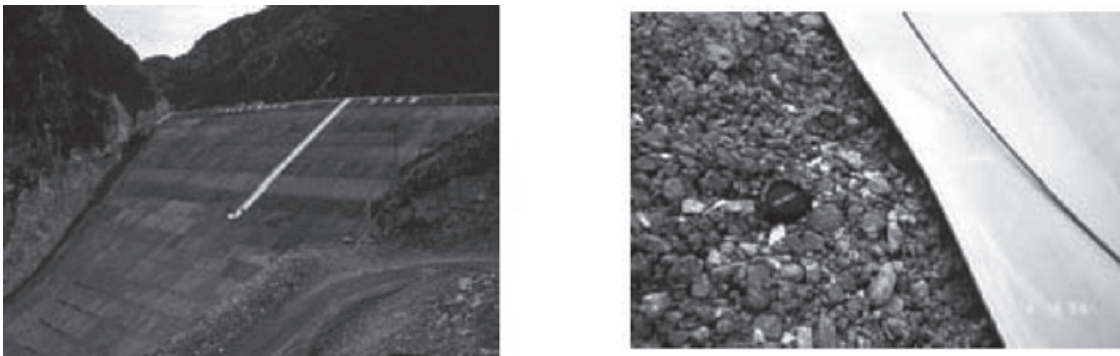


Fig. 51 and 52
Supporting layer for the PVC geomembrane at Bovilla (Albania 1996, 91 m high)
is gravel stabilized with cement

As placement of sand or gravel on a slope of 1V : 2 H or steeper, typical of rockfill dams, will result in an unstable surface, an approximately 15 to 40 cm thick layer of gravel stabilised with a low-cement content, with high permeability, may be used to provide a uniform semi-pervious support of the geomembrane. Using rounded materials for the support layer, in order to reduce the risk of puncturing the geomembrane, should be carefully evaluated, because this type of materials have lower friction angles, which could be prejudicial to the stability of the GSS, if not verified. Bitumen stabilised supporting layers can also be considered.

For the rehabilitation of fill dams with an existing upstream sealing layer of asphalt concrete or concrete slabs, since the surface normally provides a sufficient strong and even support, the supporting layer can be a geosynthetic product such as geotextile, geonet or geospacer which in some cases may be bonded to the geomembrane. In addition, the drainage layer of the new geomembrane sealing system can regulate unevenness and roughness of the surface.

4.3.4. Drainage layer

Because no man-made construction is absolutely water tight, it must be taken into consideration that also the best installed geomembrane may leak. Adequate

drainage should therefore be part of any design of a geomembrane sealing system. When the supporting layer is semi-pervious, a drainage layer beneath the supporting layer is required, if the dam body does not have free drainage characteristic.

To fulfill the requirements of drainage, the layer must:

- Collect and drain any unforeseen water leaking through the geomembrane sealing, and prevent hydrostatic pressure build up behind the sealing system in the event of a rapid draw down of the reservoir;
- Relief vapour pressure behind the sealing caused by moisture penetrating through the downstream face of the dam body, and heated repeatedly by the sun;
- Balance air pressure behind the sealing in the event of sudden changes in the atmospheric pressure.

Drainage capacity is a function of the transmissivity, which results from the thickness and permeability of the layer. For calculation of the required transmissivity, an applicable criterion is that the drainage layer should be capable of handling the largest expected leakage and avoid uplift on the geomembrane.

To be effective, the drainage layer should have a continuous, free-draining connection to a free outlet.

The drainage layer is mainly required for fill dams where the dam fill is less permeable than the supporting layer. For rockfill dams, with permeability higher than the one of the supporting layer, it is not necessary.

The drainage layer must have a high permeability.

In the case of rehabilitation (concrete slabs or asphalt concrete sealing), the drainage layer will be formed by geonets or geospacers. Geonets, which have to be strong enough to avoid the thickness being reduced by the water load on top of it, consist of polymeric synthetic ribs that cross one upon the other and are bonded together crosswise, in order to form a net that is stable in its form, and has large openings and high transmissivity. Geonets are preferable to geotextiles and are of advantage because of the superior transmissivity even under operational loading. The composition of synthetic drainage layers shall be such that during the economic lifetime of the sealing system their physical-mechanical properties are not considerably altered mainly with respect to the transmissivity.

For fill dams with low permeability, the drainage layer should be connected at its bottom to a drainage system which provides free drainage of any water in the drainage layer towards the downstream side of the dam. In new dams, the connected drainage system is normally a base drainage layer (drainage blanket). In the rehabilitation of earthfill dams with no existing base drainage layer, the water from the drainage layer can be collected by a perforated pipe embedded in a peripheral trench connected to an outlet pipe discharging downstream.

The discharge point of the drained water should be designed so that it is possible to measure any amount of water for monitoring purpose.

4.3.5. Transition zone

A transition zone is only required to assure filter function between the drainage layer and supporting layer and between the drainage layer and the material of the dam body. This element, common to every sealing element in a fill dam, is related to dam design. Requirements of this zone do not fall within the scope of this bulletin.

4.3.6. Face anchorage

4.3.6.1. General

With most geocomposites, when the inclination of the slope is gentle the friction coefficient of the geotextile layer could be sufficient to provide stability on the upstream surface of the dam. Thus, the friction provides the anchorage. Theoretically an additional anchorage of the geomembrane may not be required. Nevertheless, unless the exposed geomembrane is permanently loaded by water, it is not recommended to rely only on friction, as the geomembrane must survive the installation period, when there is no water head. Anchorage and/or ballast is required to resist suction by wind or uplift by waves, and to avoid formation of slack areas, ripples and folds that are preferential path for leakage, in case of damage to the geomembrane, and stress concentration and ageing. The case of empty reservoir should be considered when dimensioning the anchorage.

Anchorage of the geomembrane exclusively at the crest is acceptable only on short slopes, otherwise over-tensioning and mechanical failure could occur. The limit slope can be verified by calculations as those showed in § 4.2. Anchorage of the entire surface of the geomembrane is standard practise.

Surface anchorage can be by mechanical devices or gluing (exposed geomembranes), or by ballasting (covered geomembranes). For exposed geomembrane in small dams, also partial permanent ballast can be envisaged.

4.3.6.2. Mechanical anchorage

Mechanical anchorage, which applies to exposed geomembrane only, requires that the supporting layer provides sufficient strength so that the anchor can be properly fixed to resist the forces that will be transferred on the anchorage.

Mechanical anchorage is used to fix the GSS on the face in case of exposed systems on rigid subgrade (such as concrete or CFRD, bituminous concrete and steel lining), and to temporarily fix the geomembrane during construction. It is very important to understand that uplift by wind and waves will reduce the friction and therefore all forces are to be taken only by the anchors.

Mechanical face anchorage can be:

- At points over the slope surface. This type of anchorage is appropriate with a sufficient narrow grid of anchor points, and if loads are not very demanding; otherwise it is not sufficient to properly hold the liner in place because the stresses on the geomembrane at the anchors will be unacceptable. Spacing of anchors depends on the friction between the support layer and the geomembrane sealing system and the strength of the geomembrane. With high friction and high strength the spacing can be wide;

- At lines. Linear anchorage lines (parallel to slope), are installed on the dam surface. Spacing between anchorage lines, and type of anchorage system, must be designed in such a way that the geomembrane between anchorage lines is adequately kept in place, minimising tensile stresses due to uplift by wind or at reservoir draw-down. If the anchorage is to be done on the existing supporting layer, the design depends on the strength and stability of the existing layer. If the supporting layer is newly constructed, the anchorage lines can be embedded in the new facing.

Mechanical anchorage at points can be made with simple steel anchors which clamp the geomembrane onto the supporting layer. The steel anchors are fixed in the supporting layer. Using mechanical anchorage at points is not recommended, as forces applied to the geomembrane are transferred to the subgrade only through the circumference of the hole through which the anchor is inserted. Concentration of stresses on the geomembrane is extremely high. If an anchoring point fails, the stress is transferred to the adjacent points which could be not strong enough for the increased stress and fail, causing a progressive failure of the anchorage system. Anchorage at points is acceptable only if a means to transfer the forces over a larger area is provided. Anchoring by lines is preferable to the anchoring by points, as stress distribution is much more adequate.

Mechanical anchorage by lines is commonly adopted for exposed geomembrane sealing systems. In new construction a simple and effective option is to embed, in the support layer, closely spaced “wings” of the same geomembrane material of the GSS. Wings are positioned to form continuous parallel lines, to which the sealing geomembrane is heat-welded. The characteristics of weldings are verified to be able to resist to the efforts (wind, waves, etc) calculated. In this configuration the sealing system (the geomembrane) and the anchoring lines (the wings) are all made of flexible synthetic material and therefore fully capable of following deformation of the dam body. Other options for mechanical anchorage by lines include construction of vertical trenches in which strips of geomembranes are embedded or construction of concrete beams, embedded in the upstream face, on which the geomembrane is tied down with stainless steel batten strips. Some of the above options are patented.

For rehabilitation of dams that have a surface sealing made by a concrete face (CFRD), the mechanical anchorage lines can be fixed in the slabs. Conceptually, it is similar to installation on concrete dams.

For rehabilitation of dams that have a surface seal made with asphalt concrete, the mechanical anchorage of the geomembrane sealing system in the asphalt concrete support layer is difficult because of creep. To allow anchorage in asphalt concrete, an effective system has been the use of deep anchors, made with steel bars embedded in concrete mortar or grouted material which extends either in the asphalt layer or in the fill below. Anchoring by insertion has also proved to be an effective solution: creating a slot in the asphalt layer, placing the geomembrane inside and filling with suitable visco-elastic resin.

In several cases, both for CFRD and for asphalt concrete facings, anchorage lines have been effectively made with a tensioning system available for repair of concrete dams (Bulletin 78).



Fig. 53

Winscar, UK 2001. Rehabilitation of asphalt concrete face with exposed 2.5 mm PVC geocomposite. The tensioning profiles anchoring the PVC sheets to the dam face are fastened to the asphalt concrete by 200 mm long 12 mm Ø stainless steel threaded bars embedded in resin.

The tensioning system, patented, is the same as the one used for rehabilitation of concrete dams

Pullout site testing can confirm type and spacing of anchors. Anchors can either be mechanical anchors (bolts of stainless steel or straddling dowels and bolts) or chemical anchors (epoxy resin fixed anchor bars). Selection of mechanical versus chemical anchors is controversial in respect of performance in the long time. Mechanical anchors, for example, are preferred in France while in Germany, Italy, and USA, chemical anchors are more frequently used.

Batten strips and anchors must be designed for pull out, and for normal and tangential stresses. If the anchorage system also produces a pre-tensioning stress, this stress should be considered as an additional load acting on the anchor studs.

4.3.6.3. Anchorage by loading

At small dams, a pattern of weights above the geomembrane can be used as permanent anchorage supplementing the effects of the crest and toe anchorage.

Weights can be placed on the upstream face in the form of sleepers or pre-cast concrete beams or other similar type of ballasting materials. They can be placed parallel to the slope, or horizontally if there is a berm. To minimize transfer of loads to the GSS, the vertical weights shall in no way be connected to the geomembrane, and must be anchored to a structure separated from the GSS.

Weights can be embedded in the upstream face, in the form of concrete beams placed inside a vertical trench or a horizontal trench. In this configuration, the sealing geomembrane can be watertight welded to a strip of geomembrane ballasted within the trench, or be placed in the trench and covered by the weights. In this case a geomembrane strip is placed to cover the beam and is watertight welded to the sealing geomembrane. The characteristics of welding are verified to be able to resist to the efforts (wind, waves, etc) calculated. This type of anchorage system has been largely adopted in Spain in small dams.

During installation the geomembrane is normally loaded over the entire surface by sand bags to hold it in position until suitable permanent anchorage is provided or final cover is placed. See paragraph on installation.

4.3.6.4. *Gluing*

The geomembrane sealing system may be anchored by gluing the geotextile (lower element of a geocomposite) with compatible synthetic material on the dam face. This will only be possible for the rehabilitation of concrete faced fill dams. Gluing should not be continuous over the entire face to allow drainage behind the geomembrane and release of vapour pressure which would result in uplift pressure which could detach and ultimately damage the geomembrane or the supporting layer. Furthermore durability of bonding between the geomembrane and the concrete and between the glue and the geomembrane is questionable. Placement of glue is dependant from the atmospheric conditions (humidity of the support, of the air, temperature, etc) and its quality cannot be easily and objectively controlled. In general gluing is not common practice and only a few applications have been recorded (Pappadai, Italy, Bois de Cure and Les Marquisades, France).

Rehabilitation of concrete or bituminous facings with a geomembrane glued on the entire surface is not recommended. In fact, experience has shown that in such cases water bubbles (condensation ?) formed under the geomembrane. The bubbles are potential weak points which are sensible to wave action and filling and emptying, and the geomembrane can eventually break.

4.3.6.5. *Ballast anchorage (covered geomembrane)*

An alternative method in fill dams is to attach the geomembrane to the subgrade by ballast load. This load is the cover layer that also provides protection against vandalism, UV or excessive environmental aggression in general.

Whether to cover or not the geomembrane is an important decision in any design. There are several examples of uncovered geomembranes providing excellent performance for more than 25 years (see database) even in demanding environments (UV rays, high temperatures, high altitude, ice, windy areas etc.).

The cover layer which is installed on the upstream side of the geomembrane will protect the geomembrane against external forces, but will in most cases also anchor the geomembrane sealing system onto the subgrade by its weight. The amount of shear forces transferred to the geomembrane by the weight of the cover should always be evaluated, and its long term consequences duly considered based on the characteristics of the geomembrane.

It is strongly suggested that the geomembrane and the cover layer may be free to deform independently and a de-bonding layer, for instance a geotextile, be placed between the cover layer and the geomembrane. Additionally, a designer should not forget the potential damage related to the placement of the cover layer, i.e. the cover layer should not damage the geomembrane by scratching or puncturing during installation and operation. A cushioning material (synthetic or natural) is always needed for protection between the geomembrane and the cover layer. A suitable geosynthetic layer can provide both functions (cushioning and de-bonding). Special attention must be paid to avoid that the cover layer may damage the geomembrane along the joints of the concrete protection should they displace or rotate.

The designer can choose among a variety of options for the cover layer. In all cases, a drainage layer between the cover layer and the geomembrane is needed to avoid uplift. The cover layer may be of different types:

Heavy covers:

- *Fill cover layer:* a cover layer of fill material behaves favorably on the deformable fill dam. The upstream placed fill layer has to resist wave action of the reservoir. Therefore, a fill cover layer normally is constructed using rockfill or even riprap. To prevent any damage of the geomembrane by the rockfill or riprap, a transition zone between the geomembrane and the cover layer is required. This zone may be made with a strong geotextile and a transition layer out of sand and gravel. Stability of the cover layer has to be verified. Permeability has to be high to avoid uplift between the cover layer and the geomembrane, since this could destroy the cover layer.
- *Concrete slabs:* experience has shown that concrete slabs used as a cover layer entail many problems with durability and their stiffness compared to the flexibility of the base. To resist the wave action thick reinforced slabs, mostly cast in place, sometime pre-cast, are used. The slab size can be up to 5 m×5 m and the thickness in the range of 300 mm. Rouchain (France 1999) is an example. At Bovilla dam (Albania, 1996) cast in situ slabs of unreinforced concrete were 3×6m, with a thickness between 300 and 200 mm. There is also the danger of displacement of the slabs by uplift pressure if there is no provision for discharging water trapped between the slabs and the geomembrane underneath. Precautions must be taken during placement of concrete to avoid damaging the geomembrane. Precast concrete slabs should only be used if the subgrade has smooth and uniform finishing to avoid overstressing the geomembrane at the point of contact of the pre-cast panel with any local protrusion in the subgrade.
- *Gabions baskets:* (rock mattresses in rectangular baskets made of heavily galvanized, double twisted steel woven wire mesh). This cover needs to be installed with care to avoid damaging the geomembrane by pieces of metal.

Light covers:

- *Thin slabs:* cast in place or pre-cast, can be used when a light cover is requested. The dimension of the slabs is small and is usually between 5 m² and 20 m². Thickness of the slabs varies between 60 and 150 mm.



Fig. 54

Unreinforced concrete slabs installed over a 3.0 mm PVC geocomposite that is the only water barrier for Bovilla dam (Albania).

The slabs are cast in situ over a 700 g/m² geotextile protecting the geocomposite

- *Pre-cast concrete blocks*: such as those used in hydraulic structures or in road paving have also been used as a cover layer. However, they may undergo excessive movements and may finally be dislodged (Ospedale, France 1978).
- *Shotcrete*: a continuous cover can be obtained with a shotcrete layer. Thickness in the range of 40 to 80 mm is common. If required, shotcrete reinforcement can be achieved by a geotextile, or a geogrid as well as with a steel reinforcement mesh. A light weight cover allows anchoring the entire cover at crest, with no need for an intermediate support berm. The slope cover length depends on the maximum load which can be taken by the reinforcement. Appearance of this type of cover is more fragile than that of a conventional concrete slab, and shotcrete may crack, but without significant alteration of its cover function. Shotcrete cover is free draining at the back but an additional system of weepholes further relieve backpressure. This type of light cover has been successfully (Mucone reservoir, Italy 1986).
- *Bitumen premix layer*: an open-graded layer of bitumen coated aggregates with sufficient thickness to resist wave action and to withstand external loads may be used. A pre-condition is that the sealing system is compatible with the bitumen; if not a de-bonding layer may be used, such as a geotextile above the geomembrane. The temperature of the pre-mix has to fulfill the condition that the geomembrane is not affected by temperature.

The cover layer must not slide on the sealing system. Sliding stability of the layer can be obtained by self-stability and by its support at the toe of the slope (heavy covers such as concrete slabs). Sliding stability of the layer can be obtained by the friction between the cover layer with or without an intermediate protection layer and the geomembrane (fill covers). Sliding stability of the layer can be obtained by anchorage at crest (light covers such as shotcrete reinforced with synthetic materials).

Partial covers are adopted on areas where protection is required. The extent of the cover depends on the operation of the reservoir. Partial cover layers can be made with light unreinforced concrete slabs, or with a combination of shotcrete and of synthetic materials anchored at crest.

If made with concrete slabs, the tangential component of the concrete slabs weight can be supported in one of the following ways:

- By steel reinforcement anchored at the crest
- By a concrete beam, parallel to the longitudinal axis of the dam and built at the upstream face at any given elevation depending on the area to be protected
- By an H steel beam placed horizontally at any given elevation depending on the area to be protected. The beam is anchored to the crest parapet wall/concrete beam by steel cables.

Geomembrane cover requirements should consider the problems associated with tensioning or stretching the geomembrane, difficulty of visual inspection of the geomembrane, and difficulty in repairing damage without removal.

4.3.7. Anchorage at peripheries

At the periphery, the geomembrane system has to be anchored to provide a watertight connection with the dam abutment or at concrete appurtenances, but also to keep the geomembrane in place.

The primary requirement regarding the peripheral anchorage of the geomembrane sealing system is that it should allow differential deformations between the fill and the concrete structures without introducing excessive tension in the geomembrane.

Thus geomembranes connected to metal and concrete structures must be very carefully designed. A typical case would be the connection of the geomembrane laid on the upstream face of a fill dam to the perimetral concrete plinth, or spillway.



Fig. 55

Rouchain (France, 1999). Mechanical connection of the geomembrane to the intake tower was conceived to accommodate differential movements between the dam body and the intake tower

Design must be adequate to cope with settlement, deformation, and other stress-and-strain-mobilizing phenomena. In the case of a covered geomembrane system, the use of low friction sheets to act as de-bonding layers, and of sand pockets to cushion the geomembrane against possible damage due to displacement/rotation of the cover at the connection, is suggested. Providing an extra length of geomembrane at the connection increases the capability to accommodate large differential movements without any damage.

A 3 - D model is essential for adequate design at this crucial point.

Peripheral anchorage can be of the tie down (mechanical) type, or of the insert type.

4.3.7.1. Mechanical anchorage

Mechanical anchorage is applied to fix the GSS at peripheries that are placed on concrete structures (spillway, outlets). Usually, the geomembrane is compressed together with materials of lower elasticity modulus (such as neoprene or rubber gaskets) between the subgrade and a stainless steel batten strip and is back anchored into the concrete structure.

Watertightness requires the geomembrane to perfectly adapt to the subgrade, and sealing all points where water can infiltrate. Due to micro-roughness of the subgrade, gaskets and/or resin bedding layers are also required to provide a perfect coupling of the subgrade with the geomembrane. It is extremely important that an adequate compression is applied to the geomembrane and no gaps exist between the geomembrane and the anchoring subgrade. Batten strip dimensions depend on the distance between the anchors and their size. The entire assembly shall be stiff enough to seal all gaps between the geomembrane and the subgrade. Considering that at the boundaries the gradient is the highest, if there is a leak in the seal water pressure tends to lift the assembly. Where they must resist hydrostatic pressure > 50m, the batten strips are generally larger than 60x6 mm, spacing of dowels is typically 150 mm. At peripheries without hydrostatic pressure other than rain and snow melt the batten strip is in the range of 30 to 50 mm in width and not less than 3 mm in thickness. Spacing of anchors can be increased. The total stiffness of the assembly batten strip, geomembrane, gasket, shall be taken into account at all times.



Fig. 56 and 57

Left: mechanical bottom perimeter seal on concrete plinth at Bovilla, Albania.

Right: testing of components of perimeter seal. The cross section of the batten strip, the spacing of anchors, the type of gaskets, the imparted compression, concur to construct an efficient seal

The components of mechanical anchorage systems (all anchoring devices such as dowels, bolts, clamping profiles, screws) shall be in stainless steel to guarantee long life functioning without corrosion.

They shall be corrosion resistant against dissolvable chemical substances from the concrete dam or other cement products as well as from those in the reservoir water. For additional protection against corrosion, the clamping device may be covered by a geomembrane, which is welded onto the geomembrane sealing layer and obviously the geomembrane shall not be punctured by the anchors. Generally it is safer to rely only on the quality of the steel components used avoiding overlapping by the geomembrane.

Elastic bedding such as rubber, foam rubber, neoprene etc. and water stops must be resistant in contact with the anchorage system, the geomembranes and the dam material, and UV resistant. The same considerations made for type (mechanical or chemical) and spacing of anchors of mechanical face anchorage apply also to peripheral anchorage.

4.3.7.2. *Insert type anchorage*

An anchorage that can be considered to rely on friction is the so called “insert type” peripheral anchorage. Generally adopted for bottom anchorage, it consists of

a groove excavated in the subgrade (concrete or asphalt concrete), where the waterproofing geomembrane is embedded in a glue plus a suitable mastic to provide a deformable seal filling the groove flush. This type of peripheral seal can successfully cross over structural joints, cracked surfaces and is effective also on subgrades that do not have very high strength and are not suitable for anchoring systems using anchors which puncture the geomembrane (mechanical and chemical). Their use is difficult as it is very dependant on the condition of the subgrade and on weather conditions at the time of placement.

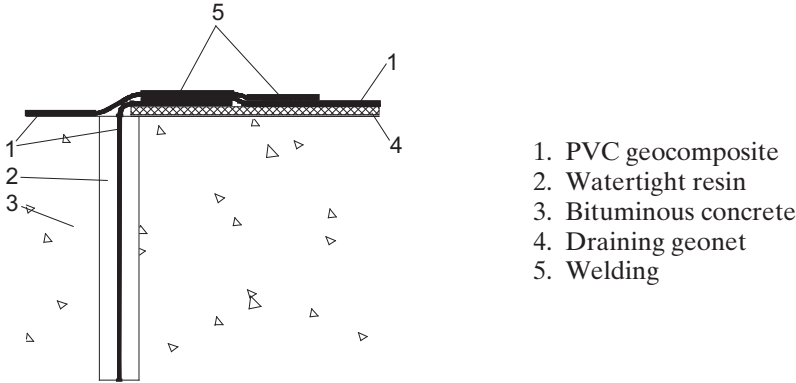


Fig. 58
 Insert type anchorage (Moravka, Czech Republic, Lechstaustufe, Germany, Pappadai, Italy, Cixerri, Italy)

4.3.7.3. Ballast anchorage

The calculation method proposed concerns firstly the anchorage of the upper geotextile, in case the GSS presents a slip surface at the geomembrane/geotextile interface, as the geomembrane has a low friction angle with the other materials. When the GSS is not stable in itself by simple friction, the upper geotextile has to be anchored to prevent any slipping and to absorb the stresses induced by the top soil cover resting on the GSS complex, thus reducing the stresses on the geomembrane. This calculation may be also applied to the anchorage of the geomembrane (exposed geomembrane for example) but in this case, the anchorage capacity of the trench can be limited in order to avoid excessive stresses on the geomembrane.

Depending on the spacial constraints of the structure, anchoring can be made in different configurations, such as simple run-out (i.e. the geomembrane is extended horizontally and then covered by the ballast) or trenches of various geometrical patterns.

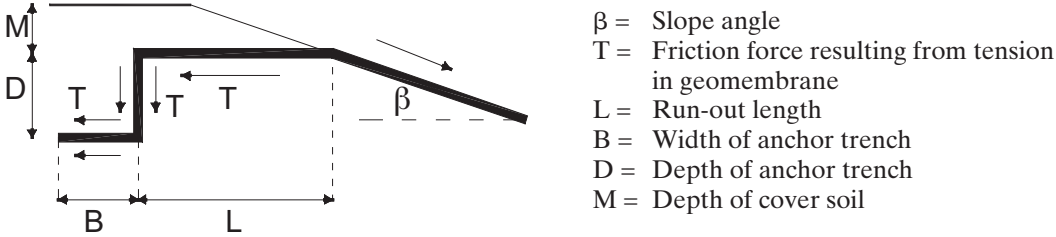


Fig. 59
 General shape of an anchoring trench

There are numerous methods for anchoring the GSS at the top of the slope. Three frequently used types have been successful (Fig. 59):

- Simple run-out on length L,
- Partial anchoring or vertical embedding (L+D),
- Complete anchoring (L+D+B).

If the foundation at the dam upstream toe and abutment periphery consists of watertight soil or rock, the geomembrane can be anchored by embedding in a trench which is backfilled with clayey material to obtain water tightness in the transition from the geomembrane system to the dam foundation. The walls of the trapezoidal trench should be lined with clayey soil without stones. Care should be taken that there are no sharp edges to the trench or sharp stones in the edge which can damage the geomembrane. This type of anchorage shall be checked for infiltration from the reservoir by-passing the trench.

The anchoring of an exposed geomembrane in peripheral trenches can only be used for small areas. The size is dependent on the whether the geomembrane on the slope can be held in place by friction, in order to avoid tension stress by the gravity load. For large areas long slopes, the risk of uplift by wind and waves exists.

4.3.8. Anchorage around pipes and penetrations

In the case of a synthetic pipe crossing the geomembrane, the geomembrane should be welded onto a collar of the pipe as shown in Fig. 60.

When a steel pipe crosses the geomembrane sealing, the watertight connection should be provided by a clamping device fixed onto a collar of the steel pipe as shown in Fig. 61.



Fig. 60 and 61
Watertight connections at synthetic pipe and steel pipe

4.4. THE INTERNAL SYSTEM

What has been said about the upstream system concerning the connections of the geomembrane with the dam foundation and any concrete structure attached to the GSS, the provision of a drainage system, the grading of the various layers according to filter criteria, also apply to the central system. It is not within the scope of this bulletin to go into details of dam design. Therefore the following considerations are meant to give general information on how these sealing systems

have been applied, rather than to establish design principles. In some cases the geomembrane has been placed upstream of the central clay core, and therefore no drainage layer has been used between the same geomembrane and the clay.

The geomembrane seal by its location inside the dam is stabilised by the dam shells, and therefore no stabilising fill or anchorage is required.

The geomembrane sealing layer is formed by single or multiple geomembrane sheets of variable width, depending on the manufacture, which are seamed together to form a continuous sealing geomembrane. Depending on the position in the dam, the geomembrane has been installed on a plane if the selected position is a sloped plane (e.g. upstream slope of an impermeable core, Zhushou in China), or as a zig zag if its selected position is close to the vertical (e. g. Fencheng and Wanfuzou in China). According to the database of the bulletin, the most commonly used internal geomembranes are polymeric thermoplastics such as PVC (12 in total, maximum height 60.2 m) and LLDPE (4 in total, maximum height 53 m), out of 20 dams. A bitumen geomembrane was used for Valence d'Albi in France.

Due to its protected position inside the dam, the geomembrane is not subject to external loads, physical-, biological- and chemical attack. Even if in reported applications the geomembrane thickness is generally much thinner than that of upstream systems, for safety reasons thickness of a PVC geomembrane in an internal position should be greater than the thickness of a geomembrane in a surface position, to survive the placement of the fill layers and to provide the highest possible durability, since the geomembrane is not accessible during operation of the dam.

The geomembrane is generally protected against puncturing by the adjacent materials. In most reported applications, the protection layers consist of geotextiles, sometimes with additional sand layers. Although in the case of an earthfill dam with fine grained fill material requirement for additional protection layers is not essential, their use is recommended to avoid stress transfer from the fill to the geomembrane. In no case should the sealing system be relied upon to achieve the stability of the fill.

4.5. PLACEMENT

The general technique to install a geomembrane system on a dam either for sealing of a newly constructed dam or a dam to be rehabilitated is quite similar and is mainly related to the type of subgrade. In both cases the geomembrane sealing system is installed on the completed upstream dam face.

Installation of the GSS can be made on the full face of the dam, by sheets unrolled from the crest. This technique is the most frequently used especially in case of rehabilitation.

Installation can be made following the phases of construction of the dam body as is typical of the internal system and of tailings dams. When the fill has reached a certain height, the geomembrane is unrolled along the slope. In new construction with the upstream system, vertical staging improves safety in respect to floods and may allow early impounding the reservoir as the construction of the watertight

membrane follows the construction of the dam. In rehabilitation, vertical staging has been adopted to allow the installation in separate phases, minimising impact on operation.

Installation of the geomembrane in horizontal layers has also been used, generally on very gentle slopes and with narrow rolls of geomembrane. This method of placement allows raising the waterproofing deck while the embankment is being built, allows minimising welding length, allows avoiding triple welds, minimizing the risk of uplift by wind, and overstresses on the horizontal seams, and if needed allows immediate placement of the cover layer. Horizontal placement has been used for example at Jibiya dam (Nigeria).

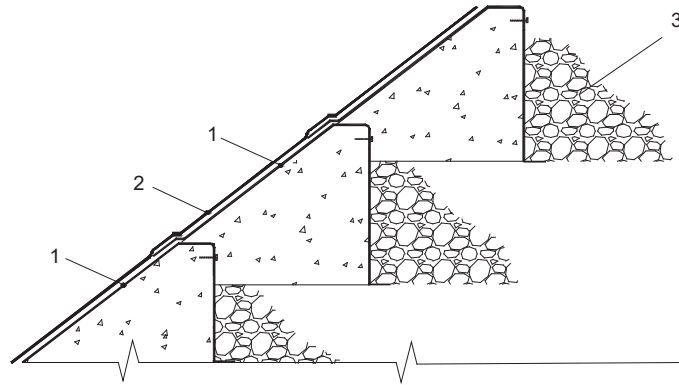
4.5.1. Supporting layer

In new construction with an upstream system, the base layer underlying the supporting layer is normally placed and compacted in horizontal layers together with the placing and compaction of the dam fill. Placing and compaction of the base layer beyond the slope line may be advisable to obtain a well compacted and stable base layer. Before placing the supporting layer the base layer should be cut back to the slope line and be re-compacted.

The supporting/drainage layer is compacted by small vibrating rollers. The final surface of the supporting layer should be well compacted, even, smooth and without any irregularities and protrusions. Compaction is crucial: at Regulating Reservoir 29 m high earthfill dam (USA 1996) the CSPE liner failed at the intake tower during initial reservoir filling due to poor compaction and inadequate preparation of liner subgrade. Over 0.3 m settlement of dam fill materials were reported.

More and more frequent is construction of rockfill dams with the so called Ita method, by which concrete extruded curbs of low cement content (60 to 70 kg/m³ of cement) are used to confine the fill material. The extruded curbs are generally made of monogranular material providing high transmissivity. The extruded curbs provide a solid supporting layer for placement and anchoring of the geomembrane sealing system. In some cases some sliding has occurred at the interface of the extruded curbs thus forming an offset on the upstream face. The sliding occurred still during the placement of the fill. The presence or the formation of offsets shall be considered to avoid stresses on the GSS, especially if the geomembrane is laid when placement of the fill is still proceeding at higher elevation and not all settlement has occurred. Curb characteristics are very important to avoid large cracks after large fill settlements. Recent experiences with curb cracking due to deformations show the importance of providing a very low strength mix to avoid large cracks, as cement rich mixes produce a negative effect by allowing very large cracks to develop.

The extruded curbs can provide a very effective and quick installation of a GSS when associated to the face anchorage system with “wings” of geomembrane, mentioned in paragraph 4.3.6.2 Mechanical anchorage. The geomembrane “wings” will form vertical lines of anchoring to which the geomembrane can be fastened using a patented system.

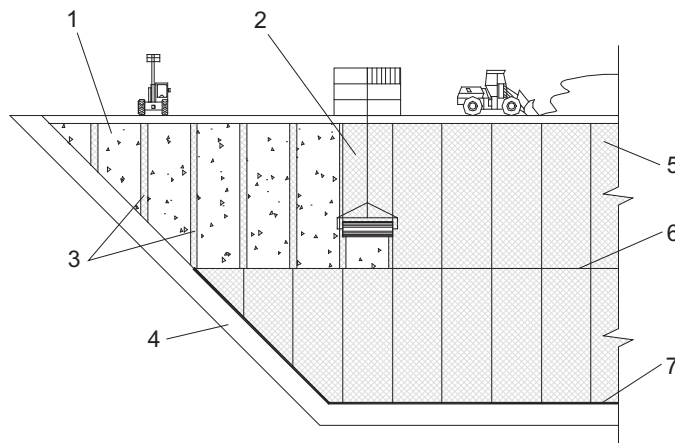


1. Geomembrane wing
2. Waterproofing geomembrane
3. Transition material

Fig. 62

Anchorage with geomembrane wings embedded in fill

Horizontal welding for connection of adjoining sheets is allowed if the stresses are taken by vertical anchorage lines, like shown in Fig. 63.



1. Concrete surface (extruded curbs)
2. Geomembrane sheet under placement
3. Anchor lines (geomembrane wings)
4. Concrete plinth
5. Geomembrane sheets welded to anchor lines (3)
6. Watertight horizontal well
7. Watertight perimeter seal

Fig. 63

Installation of geomembrane sheets on geomembrane wings

It is possible to create compartments in the support/drainage layer to better monitor the areas of potential leakage.

In the construction of new dams with internal system, since the geomembrane sheets have to be seamed together on site to provide a continuous sealing element, the geomembrane has to be installed on prepared internal dam surfaces. These can be provided for an inclined sealing system over the entire height, or can be provided in steps, forming a zigzag. In any case, the geomembrane sealing system is placed on an exposed surface. Therefore, the installation of the geomembrane system is similar to that of the upstream system. The placing of the layers on top of the

internal geomembrane is similar to the placing of a cover layer. The degree of compaction of layers adjacent to the geomembrane shall be specified, to avoid transfer of stressing to the GSS.

For the rehabilitation of concrete slab facing or asphalt concrete sealing, the geomembrane is placed directly over the existing surface unless drainage and antipuncturing layers are needed. The surface on which the GSS will be installed should be cleaned from dirt and loose parts and honeycomb areas, damaged and deteriorated areas should be repaired. It is common to place an additional synthetic layer below the geomembrane, to provide an anti-puncturing and drainage function. Usually this additional layer is laminated to the geomembrane to increase its strength and dimensional stability. The construction joints in the surface and any cracks do not need to be filled since they are bridged by the necessary supporting layer, i.e. a geotextile or a sacrificial geomembrane.

It is not essential to prepare an even and smooth base for the sealing layer, since the geotextile provides a protection for the geomembrane. However, sharp protrusions and edges should be removed to avoid stress concentration, which could result in damage of the geomembrane (Banegon, France 1973 - construction and 1983 rehabilitation).

For rehabilitation of asphalt concrete facings, preparation of the subgrade for the geomembrane requires first of all stabilising of the asphalt concrete subgrade. It is necessary to detect cavities and voids under the asphalt concrete and then to fill them up in order to prevent breaking or sagging of the subgrade. In case voids were not caused by water penetrating through the facing and the water comes from another source, it is necessary to prevent the flow of water under the facing, for example by construction of a drainage shaft, drainage wells, etc. In case asphalt concrete consists of more than two layers with a drainage layer in-between, which may be locally separated or may slide against each other, then it is recommended to remove the upper layers, for example by milling, in order to ensure that the remaining subgrade is homogeneous and stable. In the event that previous repairs have been executed, the stability at the interface and total/partial removal of the previous repair layers should also be considered. Excessive depressions must be filled up. Surface preparation is also dependant on the characteristic of the geomembrane: a very elastic geomembrane is preferable, as it adapts better to the subgrade, minimizing risk of puncture at points and burst at cavities and thus reducing the amount of surface preparation.

Before installing the geomembrane, the anchor trenches at the dam crest, periphery and toe shall be excavated and prepared. In the case of concrete structures at the crest, the periphery and toe, preparation for the peripheral anchorage shall be made.

If a face anchorage of the entire geomembrane is designed, the face anchorage system is installed on the prepared surface to fasten the geomembrane onto the dam face. The anchorage system is preferably installed vertically in the dam face to minimise tension of the geomembrane. The spacing between the vertical anchorage lines depends in most cases on the combination of the maximum wind velocity, the strength of the geomembrane, and type and pull out resistance of anchors and subgrade. If pre-tensioning system is used with a PVC geomembrane, a spacing of approximately 6 m is frequent to avoid displacements, waving, formation of bubbles,

and folding of the geomembrane. If no pre-tensioning is used, fastening lines shall be spaced closer.



Fig. 64
Moravka, Czech Republic 1999, PVC geocomposite sheets anchored at 6 m spacing

Anchor holes are drilled into the base layer of the anchorage to a depth which allows a safe anchorage. The stainless steel threaded dowel anchor rods are placed into the holes. To fix the bolts two compound chemicals or epoxy resin are normally used. Also mechanical anchors may be used. To even the base for the clamping device, epoxy mortar or other bedding material can be applied. It is strongly recommended to conduct full scale pull out tests before choosing the anchoring system. Being asphalt concrete a viscous material, strength of anchors in asphalt concrete shall be verified at the highest temperatures experienced at the upstream face of the dam.

For the rehabilitation of homogeneous fill dams, or fill dams with existing internal sealing, a stable base and/or supporting layer shall be placed on the existing dam slope. The base layer normally is placed and compacted in horizontal layers and the supporting layer vertically.

4.5.2. Placement of geomembrane

To achieve a good connection between the dam surface and the geomembrane seal without wrinkles, folding or tension, it is good practice to avoid installation of the geomembrane at temperatures exceeding + 35 °C and below + 5 °C. The placing temperatures are function of the type of geomembrane used.

Different geomembranes have different temperature ranges for seaming. A geomembrane which has strict requirements for welding temperature may strongly affect the schedule of placement.

Usually rolls of geomembrane are deployed from the dam crest downwards. Depending on the inclination of the inclined slope winch operated platforms are not strictly required, if the slope is < than 1V to 1.6H. The anchoring of the geomembrane system at the periphery and at the dam toe is done by the workers walking along the foundation line.

In accordance with an installation plan each individual geomembrane sheet is precut or factory produced to its approximate length from the crest to the toe to avoid transverse seaming and facilitate work on the dam surface.

The geomembrane sheets or geocomposite sheets with laminated geotextile are positioned on the dam crest in accordance with the installation diagram of the geomembrane sheets and are lowered down from the dam crest, using hoisting and unrolling devices such that two adjacent sheets overlap with sufficient width. In the case of an anchorage system on the entire dam face, the overlap of two sheets should preferably be at the anchorage profiles. Provisional anchorage at the dam crest and temporary ballast on the geomembrane keeps the geomembrane in place, prevents uplift by wind of the geomembrane and minimises elongation due to dead weight. However, the geomembrane should stay loose and should not stretch. No folds or wrinkles should be left as the geomembrane is unrolled, since they would complicate the seaming and would reduce the friction and therefore the stability of the geomembrane on its supporting layer. Furthermore, in case of a hole in the geomembrane, the folds will provide a preferential path for the entrance of water.

In case of an antipuncturing geotextile independent from the geomembrane above, this geotextile shall be unrolled from the dam crest before installation of the geomembrane. Individual geotextile strips shall overlap by at least 0.15 m and may be sewn together.

There are some reported cases of geomembranes being uplifted by wind during installation. As wind speeds become severe, the number of sandbags that should be used for temporary ballast becomes unreasonably high. While no easy solution is offered, the possibility of wind displaced geomembranes must be studied since design: for example this can recommend selecting a geotextile laminated in factory to the geomembrane, instead of a separate geotextile, to avoid uplift of the complex, and a geomembrane that is subsequently re-positioned on a heaped geotextile. At the installation stage, this issue shall be discussed by all parties before construction of the geomembrane begins. The proper time is at the pre-construction meeting when all parties are involved. Possible remedies are to merely reposition the disturbed geomembrane, re-seam or cap strip any torn locations, test damaged geomembrane at creases and severe distortions, or (in a worst case situation) reject the roll(s) or panel(s) involved. It must be mentioned, however, that if rejection of roll(s) or panel(s) is decided upon, the installer may not have replacement material readily available and the project will probably be delayed. Furthermore, the important issue of payment for the replaced geomembrane must be openly and carefully discussed at the pre-construction meeting: wind damage is a risk that cannot be eliminated from geomembrane installations but rather a risk that must be managed. This means finding the right balance of installation procedures that minimize probability and consequence of wind damage balanced against the expense/ schedule of the installation. In case of exposed geomembranes, the issue of wind shall be taken into account also after completion of the GSS, as discussed at 4.3.6.

Placement stresses and related strains are important and should be considered. Length increase due to temperature and sunlight changes as well as elongation by the dead weight of the geomembrane will occur. Placement elongation exceeding 2 % tend to hinder correct placement and welding. Measures to minimise stressing and elongation are essential.

A geomembrane with a low coefficient of thermal expansion is preferred.

After having the geomembrane in the exact position, the adjoining geomembrane sheets are seamed together by welding. Whenever possible, the

welding shall be made by double track automatic welding, which allows control of the entire weld. Single track manual welding is only applied at corners and where the double track automatic welding machine has no access. Seaming shall only be executed in absence of rain, or under shelter.

During the placing of the geomembrane and its anchoring on the dam face, the geomembrane is held at the crest without being permanently fastened. Thereafter, the geomembrane is fastened at the crest and at the abutment perimeters by a simple clamping device or by embedding in an anchorage trench. However, the permanent peripheral anchorage shall not be completed until the face anchorage has been placed and settled.

Where the geomembrane system is covered, on its upper side a thick geotextile will be placed. The geotextile may be placed over the entire surface of the geomembrane or only at sections.



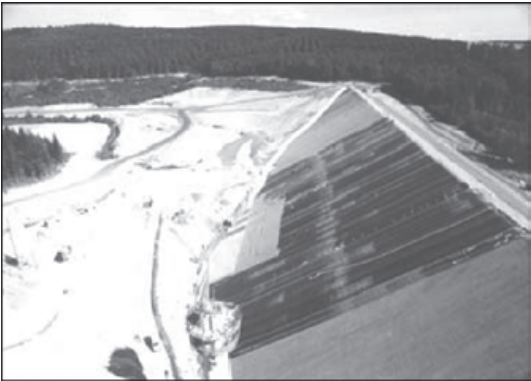
Fig. 65
Bovilla dam, Albania 1996, new construction: unreinforced concrete slabs are cast in situ over a geotextile protecting the PVC geocomposite from concreting

4.6. TYPICAL EXAMPLES

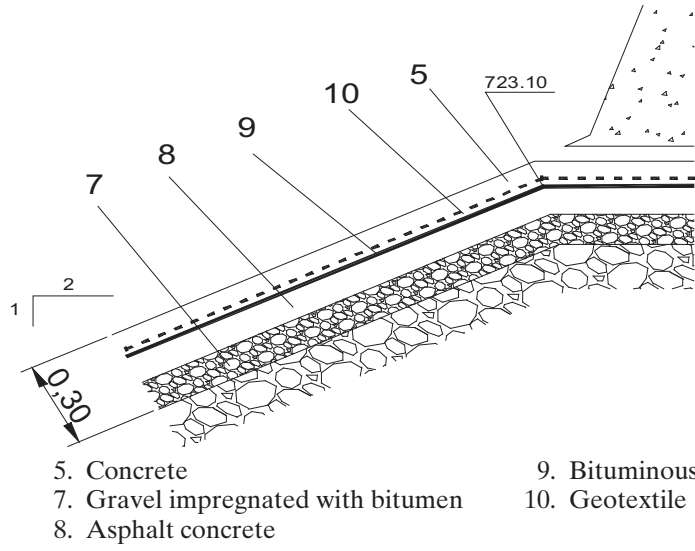
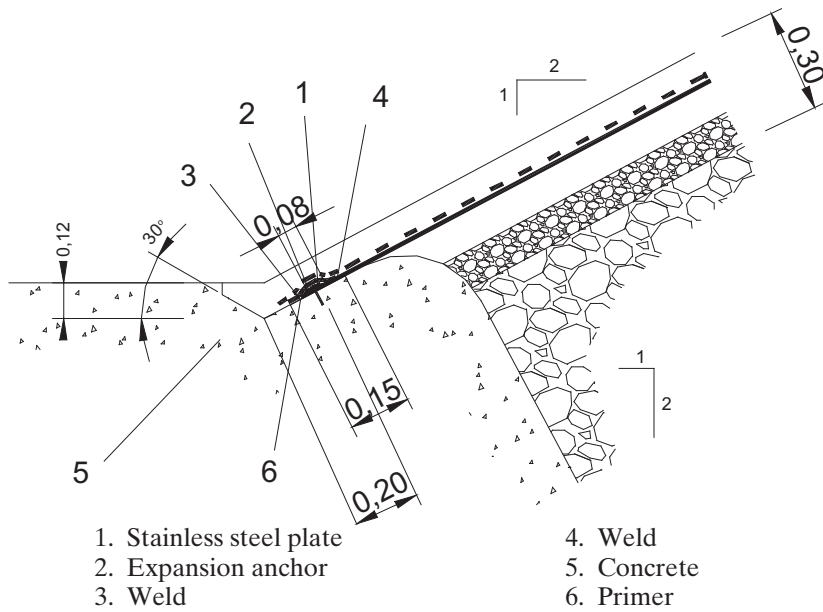
4.6.1. New construction, covered bituminous geomembrane

Appendix 1 : La Galaube Dam (France)

New rockfill dam sealed with a bituminous geomembrane.

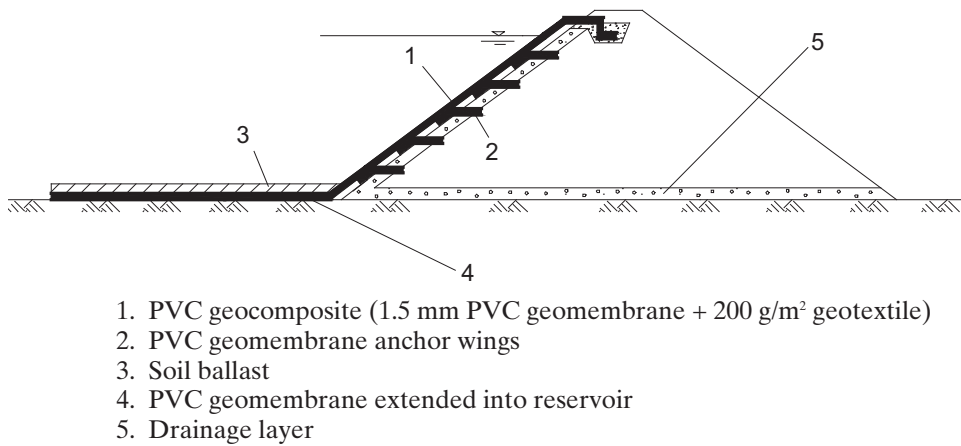


General view of the dam during the construction of the waterproofing structure

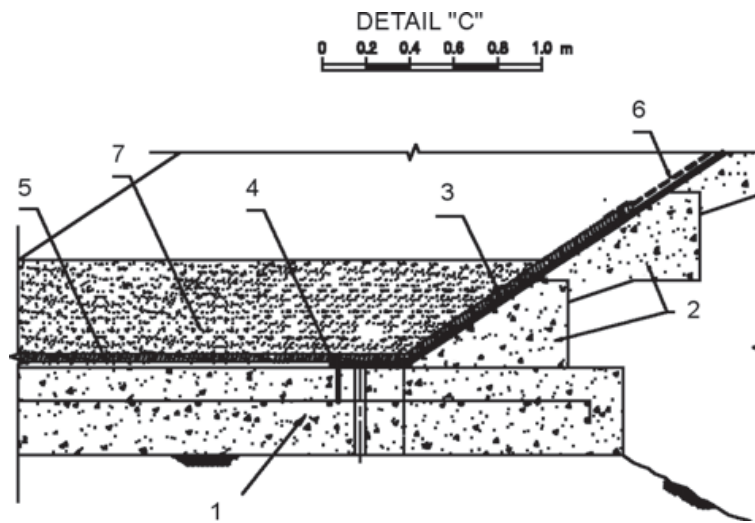


4.6.2. New construction, exposed PVC geomembrane

Appendix 1: Alento Dam (Italy)



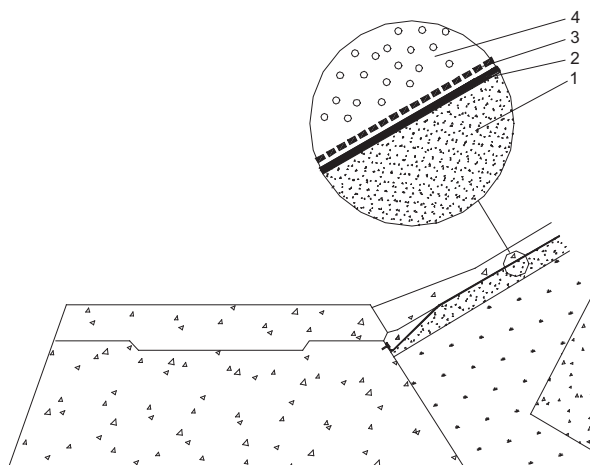
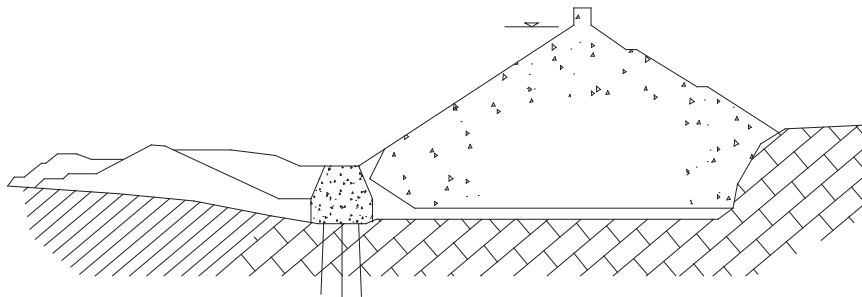
Appendix 1: Sar Cheshmeh Dam (Iran)



1. Reinforced concrete toe plinth
2. Porous concrete curbs
3. PVC geocomposite (3.0 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
4. Lower perimeter anchorage
5. GCL layer
6. Geotextile (not required above 2181.3)
7. Backfill

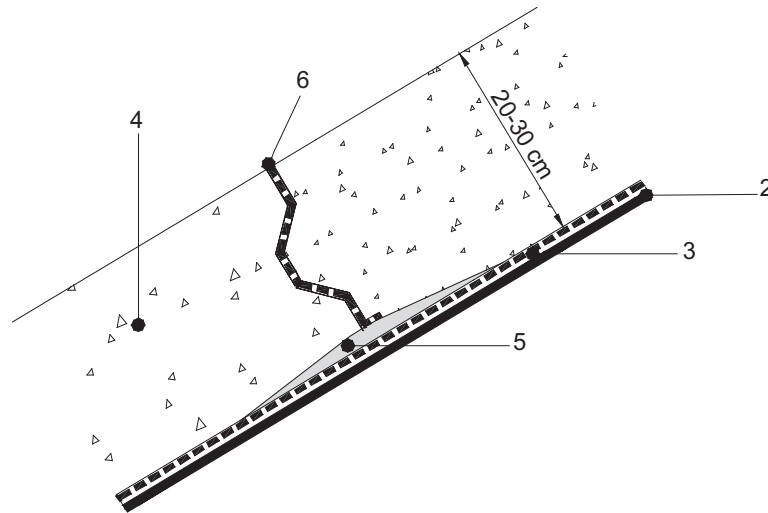
4.6.3. New construction, covered PVC geomembrane

Appendix 1 : Bovilla Dam (Albania)



1. Stabilized gravel
2. PVC geocomposite (3 mm PVC geomembrane + 700 g/m² geotextile)
3. Geotextile
4. Unreinforced concrete slab

Standard section

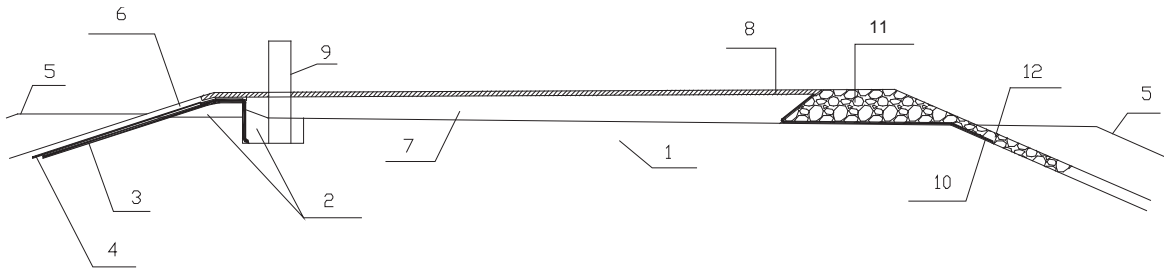


Section at joints between slabs

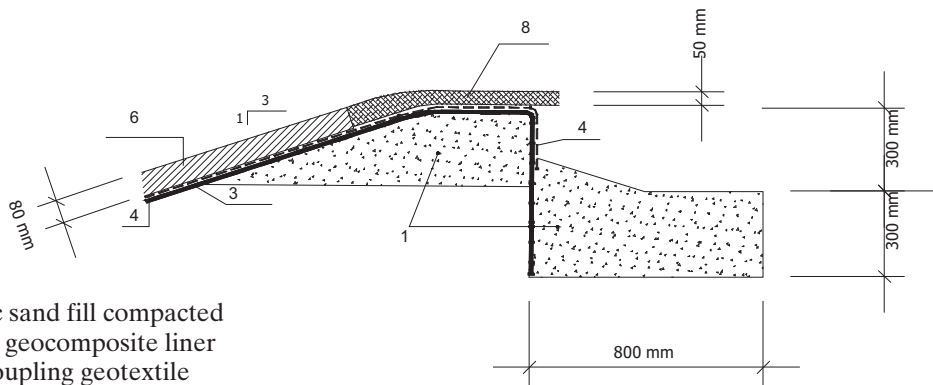
- 2. PVC geocomposite
- 3. Geotextile
- 4. Unreinforced concrete slab
- 5. Polystyrene wedge
- 6. Open draining joint with geotextile

4.6.4. New construction, covered PVC geomembrane

Appendix 1: Jibiya Dam and Reservoir (Nigeria)

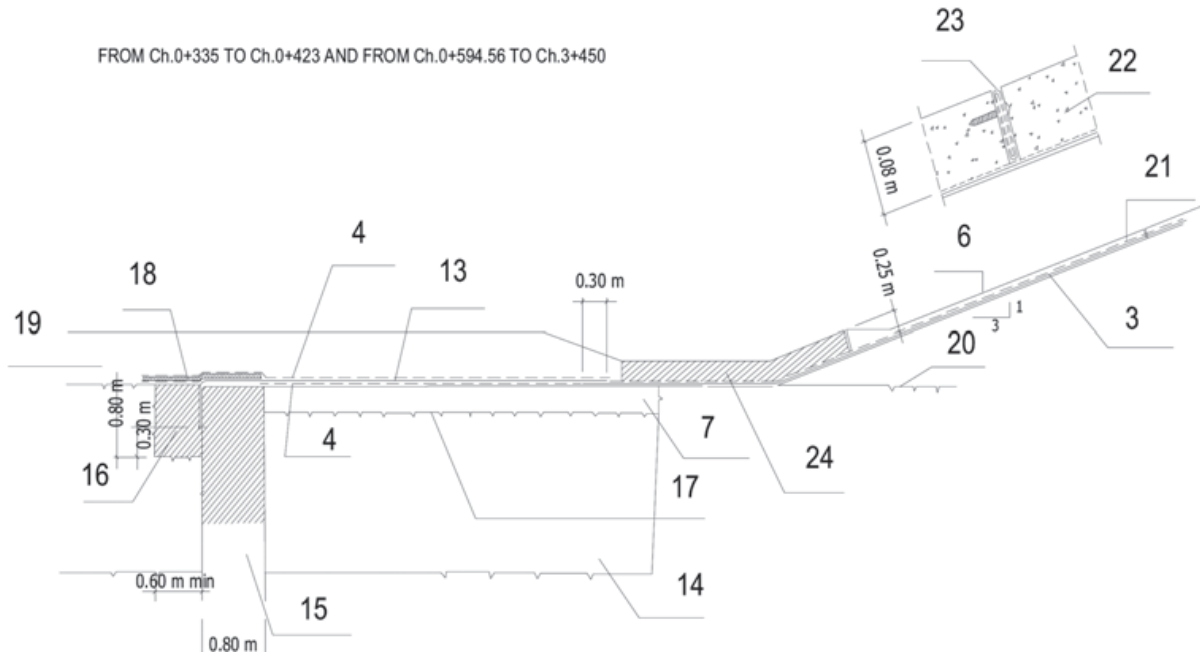


- 1. Eolic sand fill compacted
- 2. Eolic sand compacted
- 3. PVC geocomposite liner
- 4. Decoupling geotextile
- 5. Fill line
- 6. Unreinforced concrete slab protection
- 7. River sand compacted
- 8. Bituminous pavement
- 9. Concrete post
- 10. Geotextile separator
- 11. Selected rock protection
- 12. Fine rock



- 1. Eolic sand fill compacted
- 3. PVC geocomposite liner
- 4. Decoupling geotextile
- 6. Unreinforced concrete slab protection
- 8. Bituminous pavement

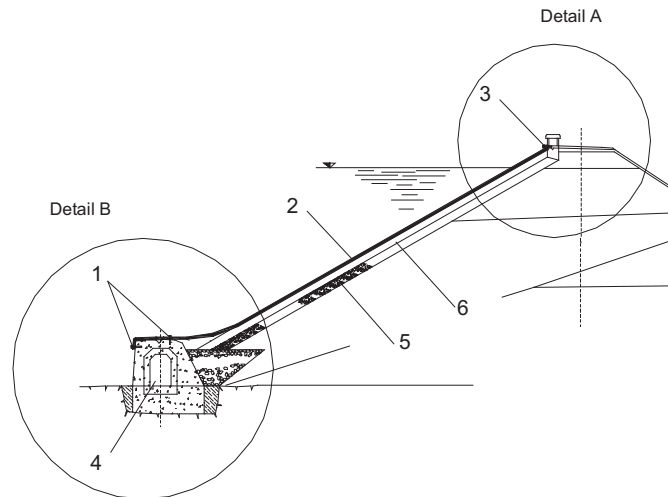
FROM Ch.0+335 TO Ch.0+423 AND FROM Ch.0+594.56 TO Ch.3+450



- | | |
|--|---|
| 13. Plane PVC geomembrane 2 mm thick | 20. Foundation grade |
| 14. Recompact foundation | 21. Decoupling geotextile |
| 15. Plastic diaphragm wall (self hardening mud) | 3. Geocomposite (PVC geomembrane 2 mm thick + geotextile) |
| 16. Fill with diaphragm wall mix | 6. Unreinforced concrete slab |
| 17. Excavate just before placing geotextile and PVC geomembrane lining | 22. Cast in place 2.00 x 4.00 protection unreinforced concrete slab (detail of 6) |
| 7. River sand compacted | 23. Geotextile nailed in place (4 folds) |
| 4. Geotextile | 24. Concrete toe slab |
| 18. Bentonite plastic cake | |
| 19. Eolic sand with > 20% fines compacted | |

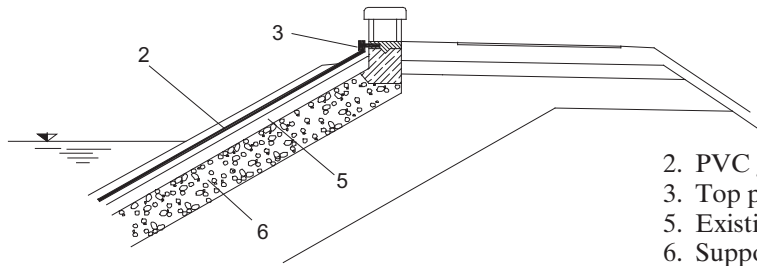
4.6.5. Repair, exposed PVC geomembrane

Appendix 1: Moravka Dam (Czech Republic)



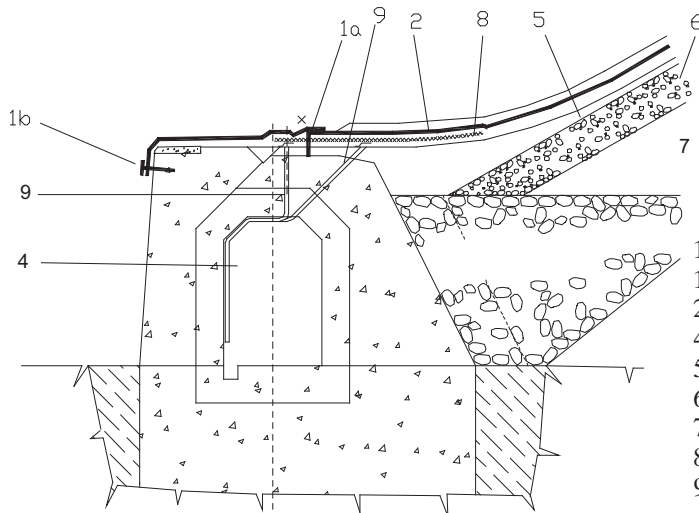
1. Watertight bottom perimeter seals
2. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
3. Top perimeter seal
4. Drainage gallery
5. Existing bituminous concrete
6. Support/drainage layer

DETAIL A

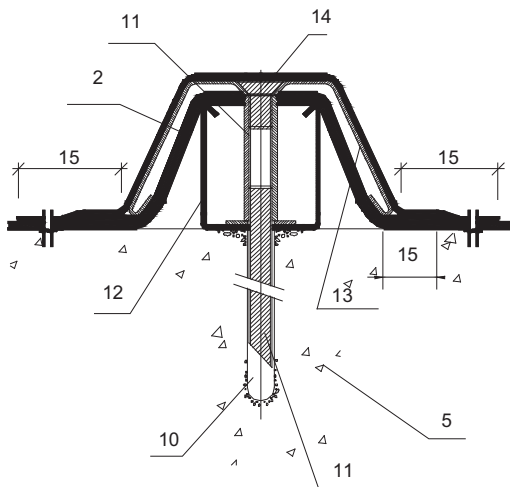


- 2. PVC geocomposite
- 3. Top perimeter seal
- 5. Existing bituminous concrete
- 6. Support/drainage layer

DETAIL B



- 1a. Perimeter seal (primary)
- 1b. Perimeter seal (secondary)
- 2. PVC geocomposite
- 4. Drainage gallery
- 5. Existing bituminous concrete
- 6. Support/drainage layer
- 7. Earthfill dam
- 8. Drainage geonet
- 9. Drainage discharge for geomembrane

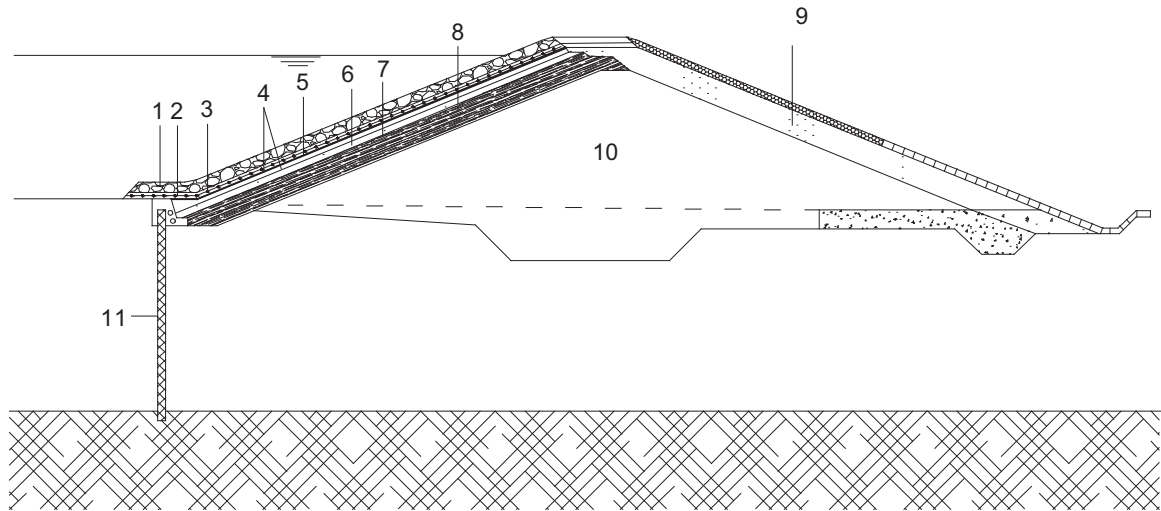


- 5. Existing bituminous concrete
- 10. Chemical anchor
- 11. Stainless steel anchor system
- 12. Stainless steel internal profile
- 2. PVC waterproofing geocomposite
- 13. Stainless steel external profile
- 14. PVC cover strip
- 15. Welding

Detail of patented tensioning system on upstream face

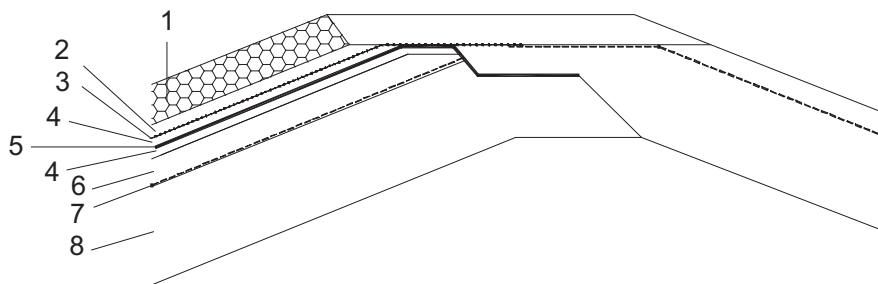
4.6.6. Repair, covered PVC geomembrane

Appendix 1: Mafeteng Dam (Lesotho)



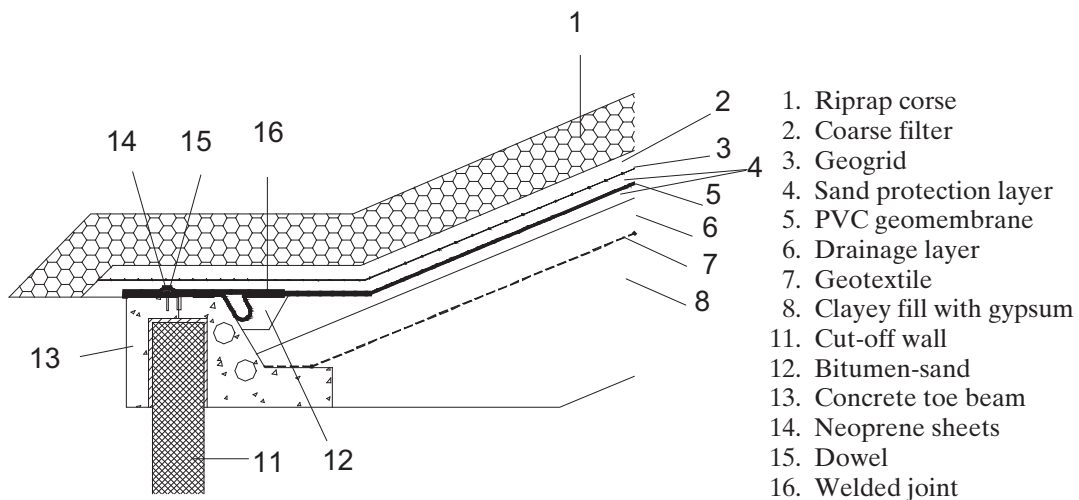
1. Riprap corse
2. Coarse filter
3. Geogrid
4. Sand protection layer
5. PVC geomembrane
6. Drainage layer

7. Geotextile
8. Clayey fill with gypsum
9. Clayey layer
10. Existing dam
11. Cut-off wall



1. Riprap corse
2. Coarse filter
3. Geogrid
4. Sand protection layer

5. PVC geomembrane
6. Drainage layer
7. Geotextile
8. Clayey fill with gypsum



1. Riprap corse
2. Coarse filter
3. Geogrid
4. Sand protection layer
5. PVC geomembrane
6. Drainage layer
7. Geotextile
8. Clayey fill with gypsum
11. Cut-off wall
12. Bitumen-sand
13. Concrete toe beam
14. Neoprene sheets
15. Dowel
16. Welded joint

5. GEOMEMBRANES ON CONCRETE AND MASONRY DAMS

This Chapter discusses the application of geomembranes in the construction of new dams and in the rehabilitation of old dams. This Chapter is limited to concrete dams and masonry dams. RCC dams are considered in Chapter 6.

The principles of design and the installation techniques are similar for the application of geomembranes in new construction and rehabilitation of dams and therefore they are described together. It should be noted that these days there is no new conventional concrete dam incorporating a geomembrane in the design, with the exception of 2 partial applications at heel.

According to the following Table 29 there are 47 concrete and masonry dams incorporating a geomembrane for watertightness.

Table 29
GSS on concrete and masonry dams

DAM		TOTAL	PVC	LLDPE	CSP E	CPE-R	In situ
Gravity	Exposed	29	28	0	0	0	1
	Covered	1	1	0	0	0	0
Buttress	Exposed	3	3	0	0	0	0
	Covered	0	0	0	0	0	0
Arch	Exposed	4	3	0	1	0	0
	Covered	4	0	2	1	1	0
Multiple arch	Exposed	6	6	0	0	0	0
	Covered	0	0	0	0	0	0
Largest installation [m ²]			17 000	17 325	9000	400	4000
Highest dam [m]			174	185	200	70	46.50
Oldest installation			1974	1981	1981	Not known	1979
Most recent installation			2006 *	Not known	1986		

* Installation of exposed and covered systems continuing up to date.

5.1. RANGE OF APPLICATIONS

5.1.1. Applications in new dam construction

It is generally considered that conventional concrete dams, due to the high content of cement, are watertight and an additional seal is not required.

In masonry dams, since the mortar in the joints of stone blocks is more permeable than concrete and therefore allows seepage of reservoir water, additional sealing components were frequently required. The first masonry dams, designed in early 1900 in Germany by Prof. Intze, were sealed at the construction stage with a mortar lining on the upstream face to reduce the infiltration of reservoir water into the dam. Later, the upstream face of the masonry dams was sealed by a shotcrete lining. These days a geomembrane sealing system would be probably considered as a technically sound, cost effective solution to replace shotcrete. However, at present, there are no new masonry dams being constructed. New concrete dams are generally built using RCC technology and are considered in Chapter 6.

5.1.2. Applications in dam rehabilitation

As reported in other ICOLD Bulletins, there are several reasons for deterioration of the watertight function in a dam. Relatively soft reservoir water results in weakening of the cement, mainly in masonry dams; in cold climates with freeze thaw cycles, the expansion of infiltrated water inside the dam causes spalling and fissures at the upstream face, which increases the infiltration of reservoir water, and results in deterioration of the concrete of the dam. Alkali aggregate reactions, which are related to the seepage of water through the dam, damage the concrete by expansion. Many existing masonry and concrete dams suffer from failed joint sealant.

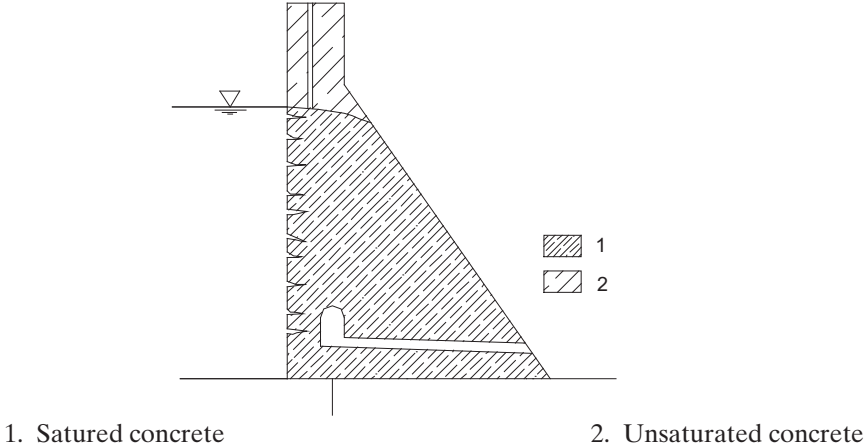
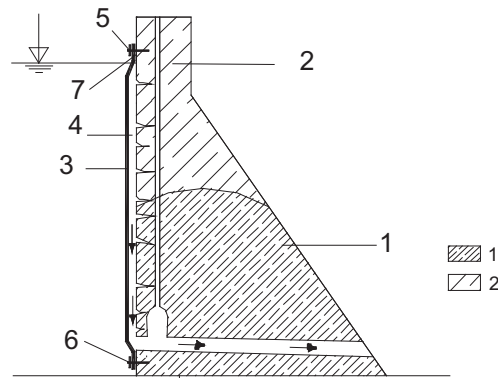


Fig. 66
Behaviour over time: drilled drains do not intercept all seeping water, which enters the dam body

When considering rehabilitation of old deteriorated concrete and masonry dams, it is necessary to consider the sealing system to intercept seepage water and reduce the attack of the water at the upstream face. Geomembranes, just a few millimetres thick, placed on the upstream face of the dams have proven to be very effective solutions in replacing the watertight function of several metre thickness of concrete sealing layers. The geomembrane option not only saves direct costs in the rehabilitation measures but also indirect costs due to a much shorter time for the installation of the geomembrane sealing system in comparison with the construction of a concrete layer.

The two main purposes of the use of geomembrane systems in the rehabilitation of old dams are :

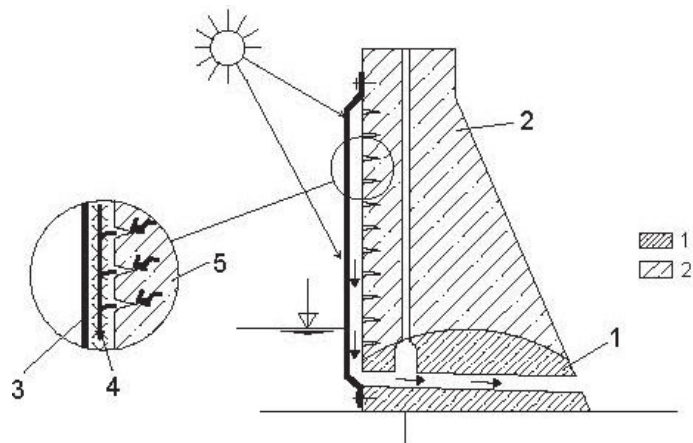
- To seal the dam to prevent further deterioration of the mortar of masonry dams and of the cement of concrete dams; the sealing may also contribute to reduce alkali aggregate reactions (Pracana, Chambon).
- To intersect the seepage of reservoir water through the dam with related hydrostatic pressure in the dam body which lead to stability problems (Chambon, Illsee, etc); the seepage can either be related to failure of joint sealant (Vale do Rossim), crack through the concrete or porous mortar and cement (Barbellino, Molato), or open voids caused by dissolved binder between the aggregate particles of the old dams (Beli Iskar, Kadamparai).



1. Saturated concrete
2. Unsaturated concrete
3. Geomembrane
4. Air gap for drainage
5. Perimeter seal
6. Watertight perimeter seal
7. Opening for ventilation

Fig. 67

Behaviour after installation of the impervious geomembrane



1. Saturated concrete
2. Unsaturated concrete
3. Geomembrane (very low permeability)
4. Drainage layer (high transmissivity)
5. Dam body (high permeability)

Fig. 68

Progressive dehydration of dam

The imperviousness of the geomembrane and the drainage associated with the sealing system provide an effective control of any seepage flow from the reservoir through the upstream face of the dam. Infiltration of water at the boundaries and at the dam foundation, however, can still occur through unprotected areas of concrete, fissures or fractured rock. The water can also by-pass the perimeter seal of the geomembrane sealing system at untreated joints and fissures, as illustrated in Fig. 69.

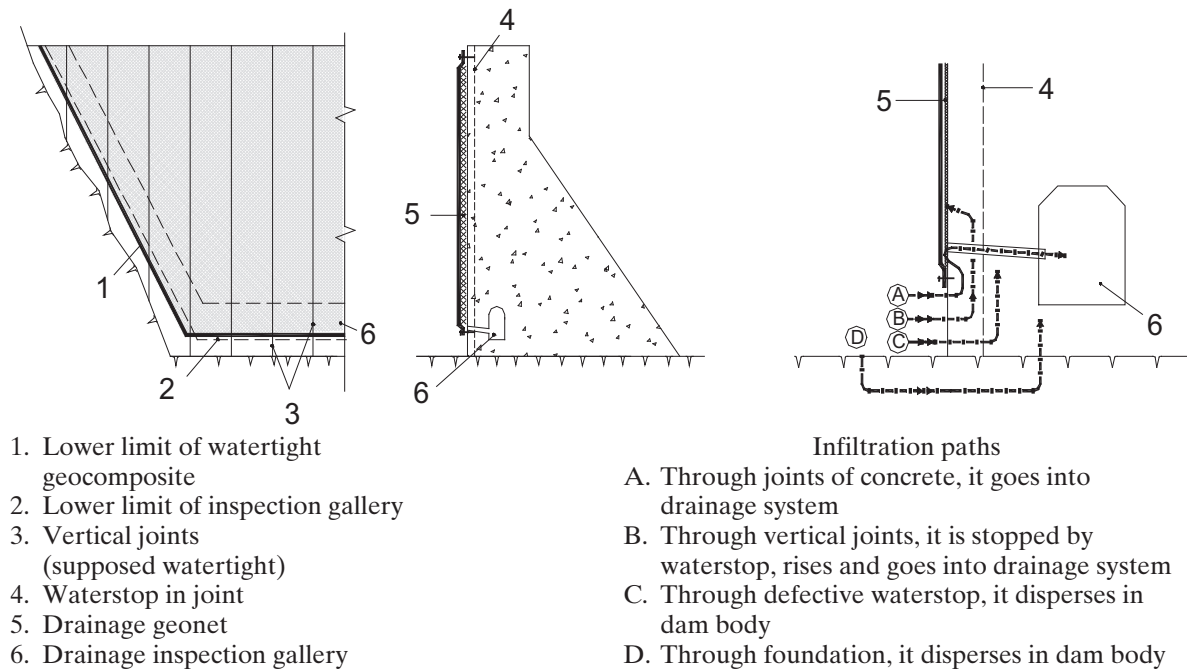


Fig. 69
 Infiltration through unlined areas

Treatment is required, by measures such as grouting of the joints and fissures intercepting the boundaries of the GSS, a new concrete plinth anchored and grouted to the foundation layer, and drainage of the foundation.

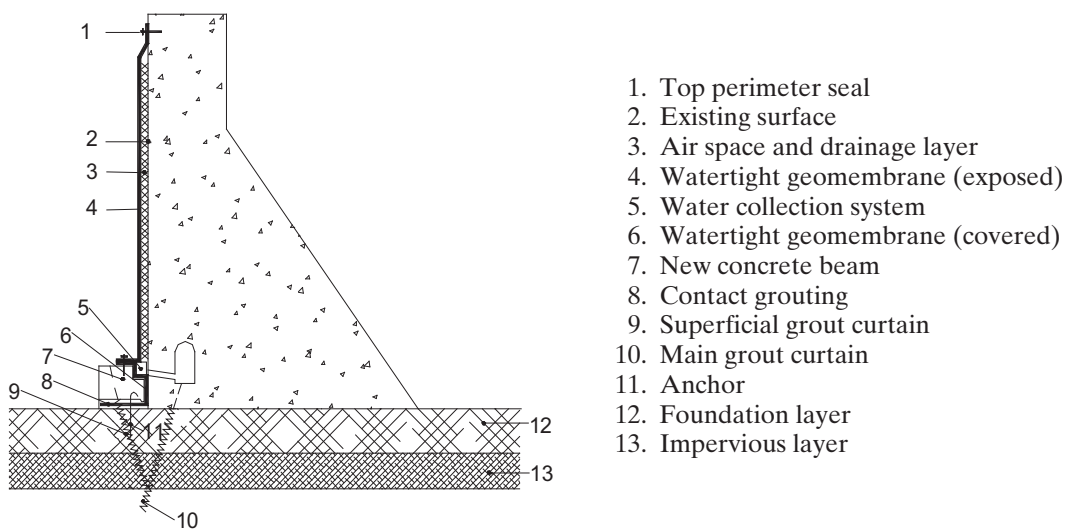
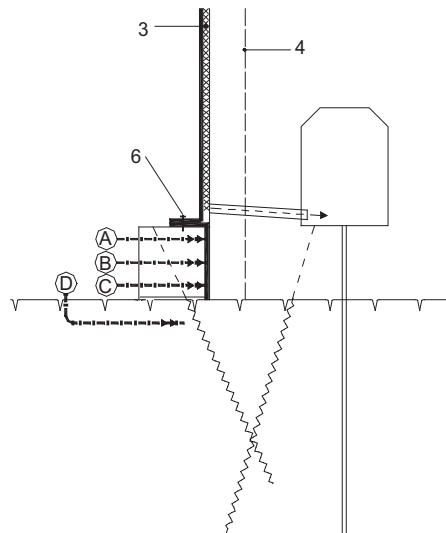


Fig. 70
 With geomembrane and new grouted plinth, the water barrier is continuous from crest to foundations



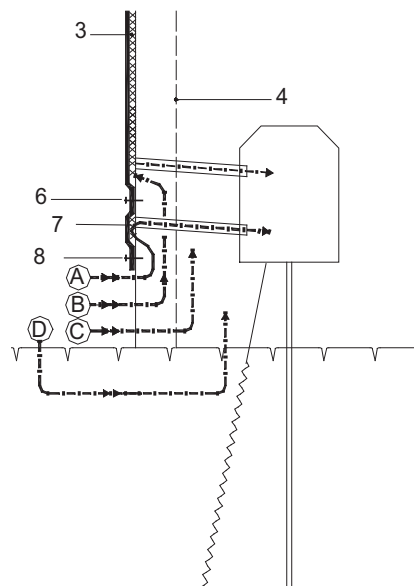
- 3. Drainage layer
- 4. Waterstop in joint
- 6. Perimeter seal

Infiltration paths

- A. Through joints of concrete, stopped by waterproofing geomembrane behind plinth
- B. Through vertical joints, stopped by waterproofing geomembrane behind plinth
- C. Through defective waterstop, stopped by waterproofing geomembrane behind plinth
- D. Through foundation, stopped by additional superficial grouting made from plinth

Fig. 71

All infiltration paths as stopped by new grouted plinth



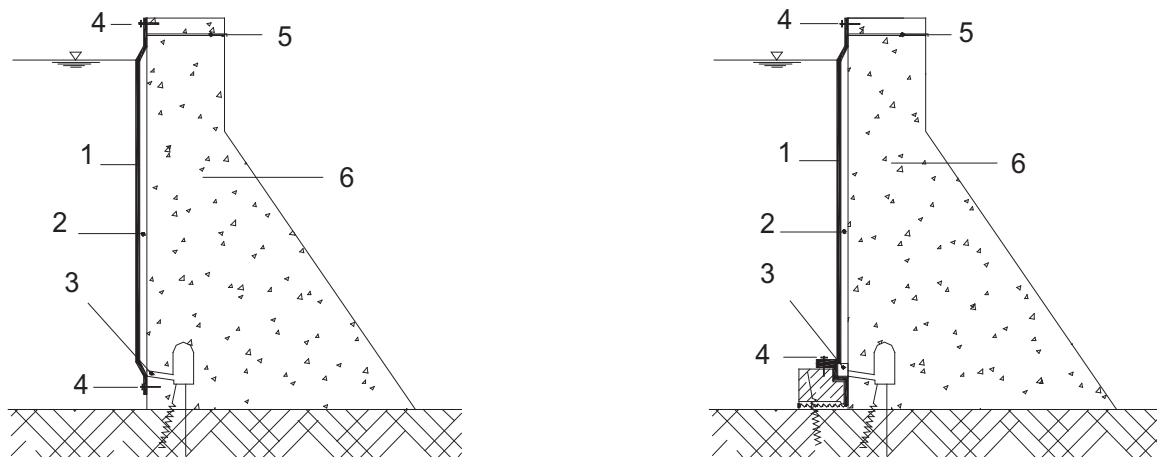
- 3. Drainage layer
- 4. Waterstop in joint
- 6. Upper perimeter seal (primary)
- 7. Discharge of drainage from foundation
- 8. Lower perimeter seal (secondary)

Infiltration paths

- A. Through joints of concrete, it goes into drainage system of foundation
- B. Through vertical joints, it goes into drainage system of foundation
- C. Through defective waterstop, it goes into drainage system of foundation
- D. Through foundation, when in dam body, it is captured by drainage system of foundation

Fig. 72

Infiltration paths as stopped by drainage of foundation



1. Geomembrane
2. Drainage gap
3. Drainage discharge
4. Perimeter seals
5. Ventilation
6. Dam body

Fig. 73

Typical cross sections in rehabilitation of concrete dams

The use of synthetic geomembrane sealing systems for rehabilitation purposes started in 1969 with the installation of a poly-isobutylene geomembrane to restore the watertightness of the 37 m high Baitone Dam in Italy (in 1994 replaced by an exposed PVC geomembrane). In 1991, a total of seven geomembrane installations for rehabilitation on concrete and masonry large dams were reported in ICOLD Bulletin 78. By 2006, geomembrane sealing systems on masonry and concrete dams have been installed on 47 dams (see Table 29), and more are under installation in 2007-2010.

5.2. DESIGN PRINCIPLES

Apart from the problem of deterioration of the material in concrete and masonry dams by the attack of water seeping through the dam, stability can be reduced by an increase in hydrostatic pressure in the dam body. In the past, a typical approach was to assume 100% hydrostatic pressure at the upstream face reducing linearly to zero (or the tailwater pressure) at the downstream toe. A reduction of two third of the reservoir hydrostatic pressure could be assumed at an internal drainage line. In accordance with “Design of Gravity Dams” by the Corps of Engineers (1995), a 50% reduction can be assumed directly behind the upstream face of conventional concrete dams. With the installation of an impervious sealing system on the upstream face, and if provided with a drained geomembrane, the reduction of the hydrostatic pressure at the upstream dam face is 100% because of the extreme low permeability of the geomembrane and the effect of the connected drainage system.

The possible reduction of the uplift pressures when using a drained geomembrane sealing system installed on the upstream face of the dam may lead to a more economical design. In case of heavy damage/degradation of the geomembrane, the resulting hydraulic conditions of the dam should be considered.

There is no limitation in dam height for the use of geomembranes to seal concrete and masonry dams. The highest concrete dam with a geomembrane is Kölblrein, 200 m (Austria 1981-1985), where the geomembrane is used as elastic waterstop between the dam body and a new concrete slab constructed for stability reasons. The highest concrete dam with an exposed geomembrane on the upstream face is Alpe Gera, 174 m (Italy, 1994).

The geomembrane sealing system is always placed in an upstream position on the dam face.

The principal design requirements of the geomembrane sealing system are:

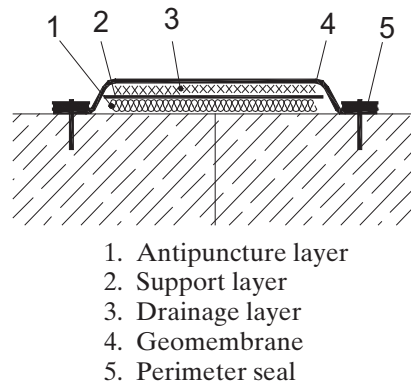
- Watertightness, provided by the geomembrane and its watertight connection with the dam structure,
- Provision of drainage behind the geomembrane to capture any leakage water,
- Ventilation in the drainage layer behind the geomembrane to balance atmospheric pressure fluctuations, to avoid building up of vapour pressure and to allow free flow discharge,
- Anchorage of the geomembrane to resist loads (wind, waves, floating debris, ice, etc.),
- When it exists, the optional external cover layer for protection of the geomembrane.

The geomembrane sealing system is divided in three main groups:

- Partial sealing systems,
- Exposed sealing systems,
- Covered sealing systems.

5.2.1. Partial sealing system

Partial sealing systems are normally used to seal specific joints such as the perimeter joint of concrete facings (Kölblrein, Austria), the joints between slabs in CFRD (Turimiquire, Venezuela, Strawberry, USA), or contraction joints with failed joint sealant (Vale do Rossim,), or fissures in the concrete upstream face (Dona Francisca, Platanovryssi) or as external waterstop in the contraction joints of RCC dams (Porce II). The design and construction of partial sealing systems are site specific. In most cases, the system comprises a geomembrane strip of sufficient width for overlapping the joint or crack, usually at least 40 cm. The strip is fastened to the concrete face of the dam by simple compression clamping devices, i.e. the geomembrane is clamped between the concrete face and a flat stainless steel profile, with gasket layers for compression distribution. To allow more efficient compression distribution, in case of a rough surface of the concrete face, the surface is smoothed by an epoxy resin coating or by grinding. The steel profile is anchored to the concrete face by stainless steel anchors, chemical or mechanical. Some frequently used details of the steel anchor as well as the dimensions of the anchors are indicated in Chapter 5.4.5.



1. Antipuncture layer
2. Support layer
3. Drainage layer
4. Geomembrane
5. Perimeter seal

Fig. 74

Scheme of partial sealing system

Another common application of partial sealing is the use of a geomembrane to confine the mastic of joints in CFRD dams. In this situation the geomembrane is not required to provide watertightness, which is, in fact, provided by the mastic joint and the embedded waterstops. This detail is not within the scope of this Bulletin.

5.2.2. Exposed sealing system

Geomembranes now comprise additives which guarantee a high UV-resistance. Therefore, it is possible to install geomembrane sealing systems with an exposed geomembrane, thus negating the need to place the so called protective layer which adds costs and in most cases is a source of damage to the geomembrane. The main advantages of an exposed sealing system are the lower construction costs, the possibility of a visual inspection of the geomembrane and the ease of access to the sealing geomembrane for repair work in the event of unforeseen leakage. For rehabilitation purposes, the quick installation of the sealing system provides a shorter interruption to the reservoir operation. Theoretically, the disadvantage of the exposed sealing system is that the geomembrane sealing can be damaged by vandalism, by sharp edged objects dropped from the dam crest and the dam abutments or by impacting debris in the reservoir. Practically, however, no cases have been reported of damage to exposed geomembranes in operation therefore the installation of a cover layer needs to be justified.

5.2.3. Covered sealing system

There are no examples of covered geomembranes on upstream face of concrete and masonry dams, except for one dam in China, for which no details are available, and 5 cases of partial application at heel.

Theoretically a cover layer may be added to provide additional weight to the dam, or if vandalism is a concern. The cover layer is attached to the dam face by means of steel bars which penetrate through the geomembrane. These penetrations through the geomembrane need to be made watertight.

5.3. LOADS

The loading cases of the geomembrane sealing system on an upstream face of a concrete or masonry dam have to be considered as described in Chapter 3. A specific loading, in case of stone masonry facing, is the high puncture caused by the rough masonry.

5.4. GEOMEMBRANE SEALING SYSTEM – GENERAL CONCEPTS

5.4.1. Introduction

The geomembrane sealing system comprises in general the following components:

- Sealing layer, consisting of the prefabricated geomembrane sheets which are seamed together on the dam surface to form a continuous sealing membrane;
- Anti-puncture layer beneath the geomembrane, which usually consists of a non-woven needle punched geotextile; most commonly the geotextile and the geomembrane are welded together in the factory and form a geocomposite; the main function of the geotextile is to protect the geomembrane against puncture and to increase the strength of the geomembrane;
- Drainage and ventilation layer, at atmospheric pressure, formed by a highly permeable synthetic material such as a geonet or geotextile and a network of pipes.

5.4.2. Geomembrane

The geomembrane has to fulfil the following general requirements:

- Resist the physical-mechanical loading without over-stressing and loss of water tightness;
- Resist UV-radiation for the entire life cycle; practically accelerated ageing tests can provide an indication of the alteration of the main physical-mechanical properties under radiation of at least 4500 MJ/m²;
- Resistance against chemical and micro-biological attack;
- Resistance against the chemical components of the cement which are soluble in water;
- Compatibility with other synthetic elements of the sealing system such as geotextile, geonet, waterstop, bedding resin;
- Non harmful to the human being;
- Resistance against puncturing. Practically impact tests in which a standard weight of 0.5 kg is dropped from a known height (750 mm and more) provide indication of such a property;
- No reduction of the water tightness under a multiple-axial elongation over a rough surface, similar to that of the surface on which the GSS will be installed, exerted by 1.3 times the hydrostatic pressure of the reservoir water at maximum level;
- During the economic life time the physical-mechanical properties shall not be altered adversely;
- No occurrence of brittleness at temperatures down to – 20°C. If minimum operation temperatures at the dam are < – 20°C, then the value shall be reduced accordingly.

Theoretically a 1.00 mm thin geomembrane can easily resist hydrostatic loads of > 1000 m, provided it is not punctured. The thickness of a geomembrane layer

should always be considered in conjunction with the degree of smoothness of the subgrade (see paragraph 5.4.3) and the presence of an anti-puncturing layer (see paragraph 5.4.4).



Fig. 75
Alpe Gera, Italy 1993, 174 m high. A 2 mm thick PVC geocomposite waterproofs
a 3 mm thick deteriorated steel lining

The geomembrane mostly used in exposed systems on concrete and masonry dams is PVC (41 cases on total number of 42 dams). No bituminous nor HDPE geomembranes have been used on exposed systems.

Table 30
Suggested values for PVC-P geocomposites

Property	Unit	Test Method	2.0 mm + 200 g/m ²	2.5 mm + 500 g/m ²
Thickness (only geomembrane)	mm	EN 1849 - 2	2.0 ± 5%	2.5 ± 5%
Geomembrane tensile strength	KN/m	EN ISO 527 - 4	≥ 20	≥ 28
Geomembrane strain at break	%		≥ 230	≥ 230
Geotextile tensile strength	KN/m		≥ 20	≥ 30
Geotextile strain at peak	%		≥ 50	≥ 50
Mass per unit area of geotextile	Kg/m ²	EN ISO 9864	200 ± 10 %	500 ± 10 %
Tear resistance	N	ISO 34- 1 meth. B without nick Fig. 2 – speed 50 mm/min	≥ 100	≥ 140
Puncture resistance	mm	EN 12691	≥ 1000	≥ 1700
Brittleness at low temperature	°C	EN 495 - 5	No failure at - 30°C	No failure at - 30°C
Hydrostatic pressure resistance	bar	EN 1928 meth. B	≥ 10	≥ 10
Dimensional stability	%	EN 1107 - 2	≤ 2.5	≤ 2.5
Thermal ageing in water : maximum weight variation after 56 days at 50°C and drying for 24 h at 80°C.	%	EN 14415	≤ 2.0	≤ 2.0
UV radiation resistance : 3000 hours (350 MJ/m ²)	–	EN 12224	No cracks	No cracks

In the absence of specific design requirements and based on experience the following conservative minimum values are suggested as safe default values of PVC geocomposites used on dams with smooth finishing: for a dam with height < 40 m, PVC-P 2 mm geomembrane + GTX 200 g/m², for a dam with height > 40 m, PVC-P 2.5 mm geomembrane + GTX 500 g/m².

The suggested values are not sufficient to define a good product. Previous successful precedents are very important.

5.4.3. Subgrade and support layer

In concrete dams, generally the geomembrane and the dimensions of the anchorage system are designed to allow the exposed facing system to be self-supporting on the stable concrete support. The supporting layer of the geomembrane, i.e concrete or masonry, must be stable, without sharp edges and protrusions, compatible with the tensile characteristics of the geomembrane.

It may be necessary to:

- Remove existing unstable facing such as gunite or spalling concrete slabs or masonry; in extreme cases, removal of the full old concrete liner may be appropriate (e.g., at Camposecco and Lago Nero dams the entire old shotcrete had to be removed),
- Add another facing as support (e.g., at Ceresole dam a new shotcrete surface was placed to stabilise and strengthen the masonry and then shotcrete was protected by an exposed PVC geomembrane),
- If an existing surface is too rough, alternatives are grinding off excessively protruding stones, local regularization with well bonded mortar layers, or placement of an anti-puncturing geosynthetic layer such as a thick geotextile, > 1 500 to 2 000 g/m² (Camposecco, Illsee, Chartrain, La Rive, Beli Iskar, Kadamparai).

Care should be taken to avoid excessive roughness and concavities since these can cause localized overstressing of the geomembrane.

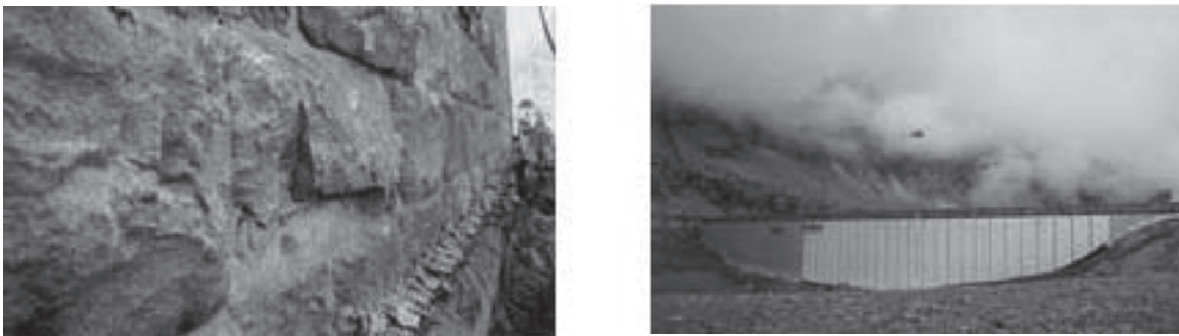


Fig. 76 and 77
Rough masonry facing of Camposecco, Italy 1993,
required installation of thick anti-puncture geotextile under the PVC geocomposite

In the rehabilitation of existing concrete and masonry dams, consideration should be given to the depth of deterioration of the upstream face. This may have deteriorated to the extent that deep anchors are required. The anchoring system shall avoid cracks and fissures. If the supporting surface shows open or active joints,

cracks or fissures, an additional supporting layer may be required to prevent the geomembrane intruding into the joint or crack. A supporting geomembrane, geotextile or geonet has proven effective when installed between the geomembrane and the support.

5.4.4. Anti-puncturing layer

The antipuncturing layer beneath the geomembrane sealing layer commonly consists of a geotextile.

To fulfil the function of a protection layer for the geomembrane, the underlying geotextile shall be compatible with the actual roughness of the supporting surface and the hydrostatic head.

A geotextile with a mass of $\geq 450 \text{ g/m}^2$ and puncture resistance $> 4 \text{ kN}$ is considered the minimum acceptable. When compressed, thicker geotextile provides a more effective protection against puncturing.

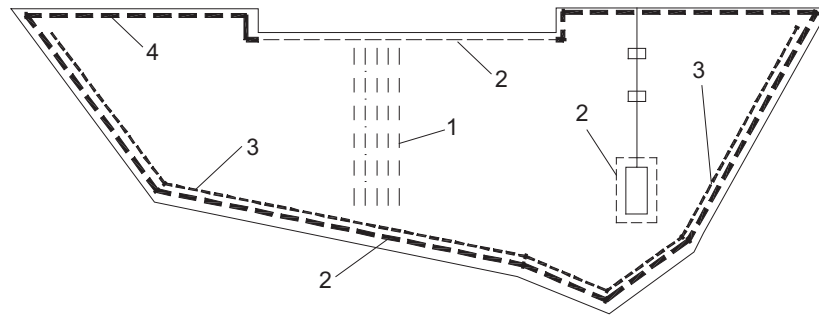
The best performance in terms of stress distribution over rough areas, buffering properties, avoidances of folds and wrinkles and increased strength, is when the geotextile is laminated by a thermal process in the factory with the geomembrane thus forming a geocomposite. The geotextile should be a non woven polymeric synthetic material consisting of fibres mechanically bonded by needle punching.

Polyester and polypropylene fibers provide better performance. If the geotextile may come into contact with fresh concrete, a polypropylene geotextile should be used to avoid alkali attack.

5.4.5. Anchorage

Mechanical face anchorage is used to fasten an exposed geomembrane sealing system on concrete and masonry dams for rehabilitation and shall be capable of transferring the applicable loads from the geomembrane to the support.

Linear Anchoring. This is the most common method for the rehabilitation of concrete and masonry dams by exposed GSS. Linear anchorage system are installed, preferably vertically, on the dam face. The spacing between the vertical anchorage lines, and the type of anchor system, must be designed in such a way that the geomembrane between the anchorage lines is adequately smooth and tensioned to avoid the formation of wrinkles and folds which are deleterious for the durability of the geomembrane: wrinkles and folds can create preferential water infiltration paths in case of accidental damage and the geomembrane can be pinched or overstressed. A tensioned geomembrane is preferable also for aesthetical considerations. Spacing of the vertical lines, the type and strength of anchors are determined as a function of the applied loads and properties of the geomembrane, mainly its modulus of elasticity. Higher modulus of elasticity (stiffer geomembranes) increase anchoring forces. The most common applied load is that exerted by the wind and relevant uplift.



1. Vertical anchorage on upstream face
2. Watertight submersible perimeter seal
3. Drainage water collection
4. Watertight NON submersible perimeter seal

Fig. 78

Typical scheme for exposed geomembranes on concrete dams

Linear anchoring allows for an effective distribution of the loading forces from a surface (the exposed geomembrane) to a line (the anchoring line) to a point (the anchors).

If the supporting layer is newly constructed, the anchorage lines can be built into the new facing (Cignana).

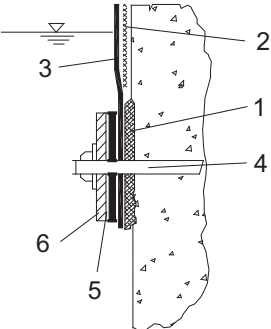
Anchoring at points. This is not recommended. The loading forces are transferred directly from the surface (the geomembrane) to a point (the anchors) through the contact between the circumference of the hole in the geomembrane through which the anchor is placed and the same anchor, inducing stresses on the geomembrane which generally exceed its strength. To reduce the stress, the applied load should be reduced, which in practice means increasing the number of anchoring points, therefore adding more holes in the geomembrane. It is obvious that holes in the geomembrane shall be avoided to the greatest possible extent.

Full Face Anchorage. The geomembrane sealing system may be anchored on the dam surface by gluing the geomembrane with compatible synthetic material. Practically gluing would only be possible for the rehabilitation of concrete dams, not on masonry dams. What discussed in paragraph 4.3.6.4 for gluing on CFRD applies also to concrete dams and gluing on the entire surface is not recommended. In general gluing along lines is not common practice and only one small application has been recorded (Zolezzi).

Mechanical anchorage at peripheries (perimeter seal). Sealing of the geomembrane at its boundaries is essential and is not dependent on the type of face fastening. The perimeter seal is the most critical part of the installation as it is subject to a high hydraulic gradient, with the full reservoir head on one side and a free flow face drainage system on the other. Unless the geomembrane is glued, mechanical anchorage should be of the clamping compression type: the geomembrane is compressed together with neoprene or rubber gaskets between the subgrade and a stainless steel batten strip (a flat, C or U shaped steel profile) which is anchored into the concrete structure, with short anchors into a strong and stable (concrete or masonry) supporting layer, or with longer anchors in the concrete or masonry dam body, if the dam face has deteriorated. The type and spacing of anchors should be confirmed by pull-out tests in the existing supporting layer. The

anchors can either be mechanical expansion anchors or chemical anchors (epoxy resin extruded or in phials and anchor bars). The selection of mechanical versus chemical anchors is controversial with regard to long term performance. Chemical anchors have been successfully used worldwide while mechanical anchors are preferred in France. All steel for batten strips, anchors, bolts, washers, etc. should be stainless steel, usually AISI 304 and 316. Dimensions of the batten strips and the spacing and size of anchors are site specific and should provide adequate compression of the geomembrane against the supporting layer, avoiding the creation of fish mouth openings through which water would infiltrate.

Perimeter seals below water level are subjected to the greatest head. Commonly, perimeter seals use 60 x 6 mm or 80 x 8 mm stainless steel batten strips with head respectively less or greater than 50 m. Anchors are usually spaced at 150 mm, they have a diameter of 12 mm and a length greater than 100 mm.

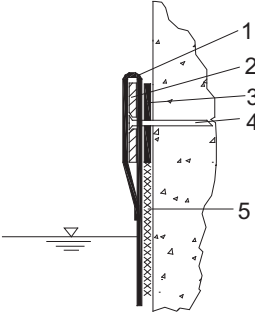


- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 1. Regularising layer | 4. Anchor |
| 2. Drainage geonet | 5. Rubber gasket |
| 3. Geomembrane | 6. Stainless steel batten strip |

Fig. 79

Watertight perimeter seal below water level (submersible)

Perimeter seals above water level should resist infiltration by rain and snow but they are never fully submerged, nor airtight, thus allowing ventilation and relieving vapour pressure (see 5.4.6). They are usually formed with stainless steel batten strips, at least 30 x 2 mm, and 8 or 10 mm anchors, at 200 to 300 mm spacing.



- | | |
|---------------------------------|--------------------|
| 1. Geomembrane | 4. Anchor |
| 2. Stainless steel batten strip | 5. Drainage geonet |
| 3. Rubber gasket | |

Fig. 80

Watertight perimeter seal above water level (non submersible)

5.4.6. Drainage and ventilation system

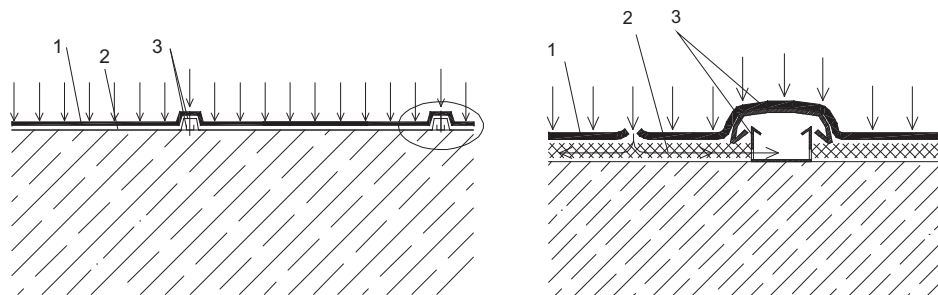
5.4.6.1. General

The purpose of the drainage system is:

1. To collect and drain any water which may infiltrate through the geomembrane, thus preventing hydrostatic pressure acting against the dam face and allowing pressure balance of the geomembrane in the event of a rapid draw down of the reservoir,
2. To relieve vapour pressure behind the sealing layer caused by the humidity of the dam body, which due to differential pressure created by differences in the temperature, tends to migrate towards the surface with lower pressure,
3. To balance air pressure behind the sealing layer in the event of sudden changes in the atmospheric pressure, for instance when wind blows,
4. To allow the monitoring of the watertightness of the geomembrane sealing layer.

The almost vertical face of concrete and masonry dams facilitates the flow of any leakage water. The water flows by gravity in the gap between the sealing and the dam face and then is collected at the base into a perimeter collector, which discharges into the inspection gallery or directly downstream, or in a sump with pump. Discharge of all drainage water should be monitored.

The presence of an additional drainage layer such as a geonet increases the transmissivity. The anchoring profiles which fasten the geomembrane to the face of the dam may provide additional drainage as found in some patented systems.



1. Geomembrane
2. Continuous face drainage layer
3. Patented anchorage profiles forming a vertical drainage conduit (for detail, see 4.6.5)

Fig. 81

Seepage water, intercepted by the face drainage layer (and patented systems by vertical drainage conduits), is conveyed to bottom collection and discharge

The suggested materials for the face drainage are synthetic materials with a considerable amount of voids, such as geotextiles and geonets. Geonets have superior transmissivity but inferior compressibility compared to geotextiles. The ribs of the geonet form preferential travel paths for drained water and air ventilation. At impounded reservoirs, the hydrostatic pressure modifies slightly the geometry of the geonet and therefore transmissivity and drainage/ventilation capability remains significantly unaltered. The strength of the ribs of a geonet should be confirmed for adequacy particularly if installed on an aggressive surface, which can break the ribs themselves and reduce the transmissivity.

Water drained in the face drainage system flows by gravity through the drainage layer into a peripheral collector placed at the lowest boundary of the geomembrane. The bottom collection is made usually by a peripheral conduit, a perforated pipe that is

positioned at the heel of the upstream dam face. The collector can be embedded in the dam face (Chambon, France), placed external to the face (Illsee, Switzerland, Pracana, Portugal) or embedded in a new concrete plinth (Camposecco, Italy). The collector at the bottom may be a box drain, i.e perforated pipes embedded in a trench filled with drainage material or, instead of the pipe, a supplementary strip of high transmissivity geonet installed along the submerged perimeter seal (Fully, Switzerland). See Fig. 82.

5.4.6.2. Design of the drainage system

	<ol style="list-style-type: none"> 1. Geomembrane 2. Drainage layer 3. Drainage collection pipe embedded in plinth 4. Discharge pipe 5. Waterproofing geomembrane behind the plinth 6. Plinth 7. Porous concrete 8. Watertight seal 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Geomembrane 2. Drainage layer 3. Drainage collection pipe 4. Discharge pipe 5. Waterproofing geomembrane behind the plinth 6. Plinth 7. New porous concrete 8. Watertight seal
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Geomembrane 2. Drainage layer 3. Drainage collection profile 4. Discharge pipe 5. Cover plate 6. Watertight seal 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Geomembrane 2. Drainage layer 3. Box drain 4. Discharge pipe 5. Grouting 6. New concrete 7. Watertight seal
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Geomembrane 2. Drainage layer 3. Drainage collection pipe 4. Discharge pipe 5. Existing concrete 6. Porous concrete 7. Watertight seal 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Geomembrane 2. Drainage layer 3. Drainage collection pipe for upstream face 4. Drainage discharge for upstream face 5. Drainage discharge for foundation 6. Drainage collection pipe for foundation 7. Porous concrete 8. Impervious concrete 9. Watertight seal 10. Waterstop and geocomposite

Fig. 82
Drainage collectors' configurations

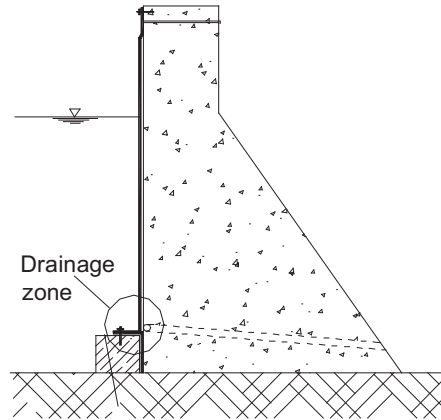


Fig. 82 (continued)
Drainage collectors' configurations

The concepts on drainage illustrated in Chapter 4 on fill dams apply also to concrete dams. The supporting layer in concrete or masonry in general does not provide adequate drainage, and generally a geosynthetic drainage layer is placed between the support and the geomembrane.

The design of the drainage system must assess its capability for collecting and discharging a predetermined quantity of water. All the elements of the drainage system should adopt a balanced design capacity.

The design of the drainage system should take into consideration that the water may be collected behind the geomembrane mainly for two reasons: a defect or damage in the geomembrane, or water by-passing the perimeter seal, which could be water from the reservoir (usually under high hydrostatic pressure, lower seal) and/or from the crest (top seal). Important decisions are required relevant to the flow which the drainage system should be designed to handle. The design can be considered under two main categories:

a) The drainage system is intended to carry low flows and to provide a simple monitoring system for the efficiency of the geomembrane. Any abnormal high flow at the discharge point shall instigate a search for the infiltration point, which could be a defect in the geomembrane or a leak past the perimeter seal. Once the source has been located, a decision can be made about the necessity and method of repair. In the case of a large rate of infiltration the drainage system may not be capable of providing a rapid discharge and the water may build up in the drainage layer behind the geomembrane and therefore apply hydrostatic pressure to the face. If this design is adopted, the dam should be capable of withstanding the pressure. This is the case when the geomembrane is installed as a preventive measure to avoid further deterioration of the face, which is the most frequent case reported, and temporary pressure against the face is generally not a concern.

b) The drainage system is designed to avoid hydrostatic pressure applied to the upstream face. This case is typical of dams with large fissures, open lift joints, those affected by AAR or located in highly seismic areas. The volume of flow to be discharged shall be of the same magnitude as the volume which may infiltrate into the system. Practically no build up of pressure, even temporarily, is accepted in the drainage layer. Understanding the possible source of infiltration is important for the design

b1) Infiltration due to defects of the geomembrane. The current experience, confirmed by the findings of the data base, shows that a defect in the geomembrane is an extremely remote event. The quantity of water which may infiltrate depends on the size of the defect and the associated water head in the reservoir. Unless there is a sudden collapse of the subgrade at great depth, the defect is most probably localized near the surface of the reservoir. A repair can be easily performed, in the dry or even underwater.

b2) Infiltration due to by-passing of the geomembrane perimeter seal. If the search of the source of infiltration shows that the defect is at the level of the perimeter seal, with water bypassing the seal through untreated cracks, joints, waterstops, etc. then the repair may require more complicated and time consuming measures such as grouting.

The designer shall assess the volume to be collected and discharged. A very effective high capacity drainage system will add cost to the project, which may not be justified if all other works such as strength of the support, treatment of potential infiltration points intersected by the perimeter seal and proper contact grouting of the perimeter plinth have already been properly addressed. A high capacity drainage system increases the safety of the geomembrane sealing system, as it prevents build up of pressure which may burst the geomembrane in case of rapid draw down. On the other hand, it may deliver a substantial quantity of water into the inspection gallery. Having such a high volume of water in the gallery may not be acceptable, because it confers the impression that there is high leakage through the dam. The drainage system is mainly intended to monitor the efficiency of the geomembrane: an abnormal rate of leakage would suggest a defect in the geomembrane, while in reality the drainage system is mainly collecting water which may come from different sources other than a defect through the geomembrane. For instance water infiltrating through fissures and bypassing the perimeter seal, or infiltrating from foundations, or from crest. Thus it is possible that the amount of water at the discharge point is high, while the dam body is totally dry. If other works aiming to reduce other potential sources of infiltration are performed (treatment of potential infiltration points intersected by the perimeter seal, proper contact grouting of the perimeter, strength of the support), a high capacity drainage system which adds cost to the project is not justified. Normally a high transmissivity drainage geonet or geotextile are sufficient.

The fact that any leakage is intercepted by the face drainage system and is discharged before it applies pressure to the upstream face and infiltrates the dam is a fundamental principle in all drained geomembrane systems and should be recognized as a positive feature and not a deficiency.

A discharge from the drainage of a geomembrane sealing system does not provide evidence that the defect is in the geomembrane alone. Monitoring of the discharge from the drainage system of the geomembrane sealing system is not a sufficient measure to monitor the behaviour of the same geomembrane system nor of the dam, as the infiltration may occur through the geomembrane, by by-passing of the perimeter seal or through the foundation. Interpretation of the data should be done in conjunction with the other conventional measurements such as piezometers

etc. A more effective monitoring of the geomembrane system should include a monitoring system for the geomembrane only, such optical fibre cables, geo-electrical leak detection systems, double geomembranes etc. as discussed in Chapter 8.

The importance of the readings of the drainage system are also discussed in Chapter 9, Acceptance Criteria.

In some cases, to facilitate the location of leaks and the monitoring of the sealing system, the surface of the geomembrane is divided into smaller areas, conventionally named compartments. The definition of compartments is obtained by additional fastening profiles which contain the flow of the drained water in the confined areas, each with a dedicated collection, discharge and ventilation system. This solution adds cost and it should be assessed if a simple drainage system associated with other monitoring systems of the geomembrane would provide sufficient information. The advantage of additional compartments is an increase in safety of the system. At Pracana buttress dam, affected by AAR, the 10 000 m² surface was divided into 9 independent compartments.

5.4.6.3. Construction

The drainage water can be collected either in a peripheral collector conduit or at the bottom of individual drainage compartments by gravity through inclined drainage holes running from the collector through the dam body towards a drainage/inspection gallery (if provided either in the dam body or at the upstream dam heel) or towards the downstream face of the dam. Upstream collection and discharge could also be undertaken, by pumping the water from a pump sump up to a discharge point (possibly at the crest) through a dedicated pipe installed on the upstream face.

A geonet should consist of polymeric synthetic ribs which cross one upon the other and bonded together crosswise to form a stable net with large openings and high transmissivity. The composition of the raw material shall be such that after a life of at least 40 years the physical-mechanical properties are not considerably altered particularly with respect to transmissivity.

The geonet typically would have the following main properties:

- Weight $\geq 1000 \text{ g/m}^2$
- Thickness $\geq 7 \text{ mm}$
- Tension force $\geq 10\text{kN/m}$
- Transmissivity $\geq 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

5.4.7. Exposed geomembrane and anchorage system

There are 42 dams with exposed geomembrane sealing system.

The largest majority used continuous anchoring lines to allow uniform distribution of stresses.

A popular system, which has proven effective and was already cited by Bulletin 78 (1991), consists of pairs of stainless steel profiles installed along parallel vertical lines on the face of the dam. The system is patented.

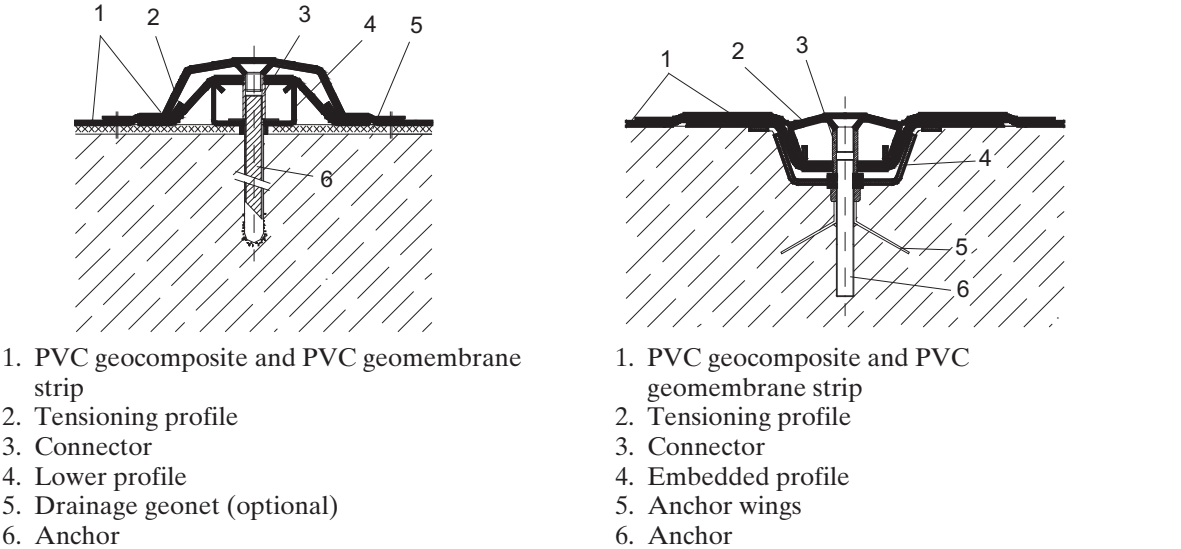
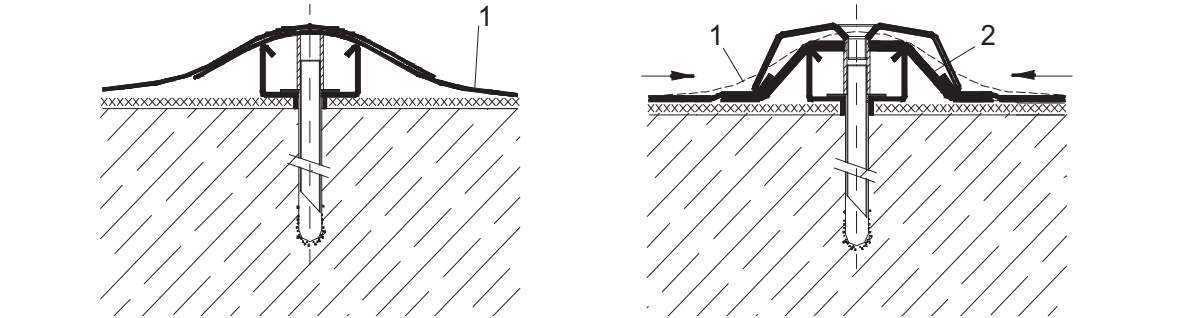


Fig. 83 and 84

The patented tensioning system in its two possible configurations: with both profiles external to the dam face (left), and with one profile embedded in new support layer (right)

The lower profiles are fastened by means of chemical anchors drilled in the dam upstream surface. Rolls of geocomposite are unrolled from the crest of the dam, overlap and are welded to correspond with the lower profiles. The upper profile, by means of a stainless steel connector, forces the geocomposite onto the lower profile, creating a pretension to the geocomposite.

The shape of the two profiles and the clamping effect apply a uniform linear fastening of the geocomposite. The pretensioning effect minimizes the problem of sagging caused by the dead weight of the geocomposite.



1. Configuration of the PVC geocomposite before tensioning is made
2. Configuration assumed by the geocomposite after clamping of the upper profile

Fig. 85

Pretensioning effect of the two profiles (patented)

The two profiles also create a vertical free flow drainage channel in which the water behind the geocomposite is collected and conveyed to the heel of the face, for subsequent discharge. Strips of geomembrane are welded over the vertical profiles, to seal the holes necessary for the installation of the steel connectors. One main

advantage of the described fastening system is the capability to provide, in association with the geotextile and/or the geonet, an effective surface drainage system just behind the geomembrane.

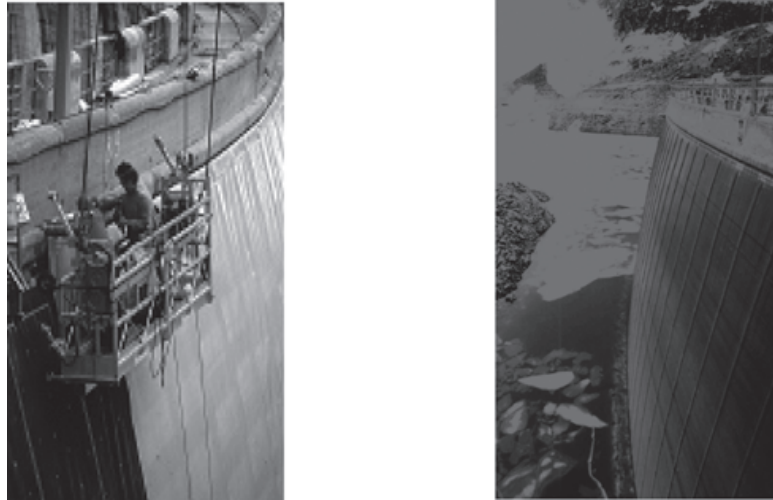
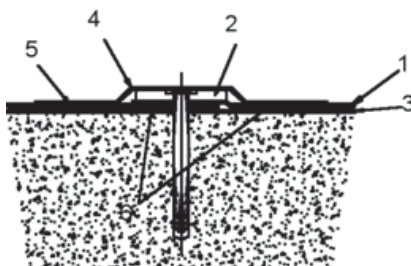


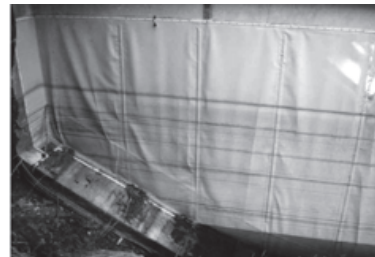
Fig. 86 and 87

Evidence of pre-tensioning effect at Publino, Italy: before (left) and after (right) installation of tensioning profiles

Other anchorage systems can also be used. At Echapre dam, France, anchorage lines have been made with flat batten strips which do not allow pre-tensioning.



1. PVC geocomposite
2. Flat batten strip
3. Geonet



4. PVC geomembrane
5. In situ weld
6. Prefabrication weld

Fig. 88 and 89

Flat anchorage system at Echapre, France. After 10 years of service, the folds observed did not so far have any consequences



Fig. 90 and 91

Anchorage with tensioning profiles (Girotte, France 1997, at left) providing adherence of the geocomposite with no wrinkles and no sagging, and on the right with simple flat batten strips (Echapre, France 1997), which entails formation of ripples and folds. In case of puncturing of the geomembrane, they form preferential channels for consistent infiltration of water. Furthermore, folds have a different exposure to UV rays, allow sticking of ice, all resulting in uncontrolled stresses

At the crest of the dam, the geocomposite is fastened by a horizontal batten strip of variable strength, depending upon the conditions. An upper seal which is to resist only limited hydraulic head such as rain, snow or occasional waves will differ from one subject to serious overtopping such as at a spillway.

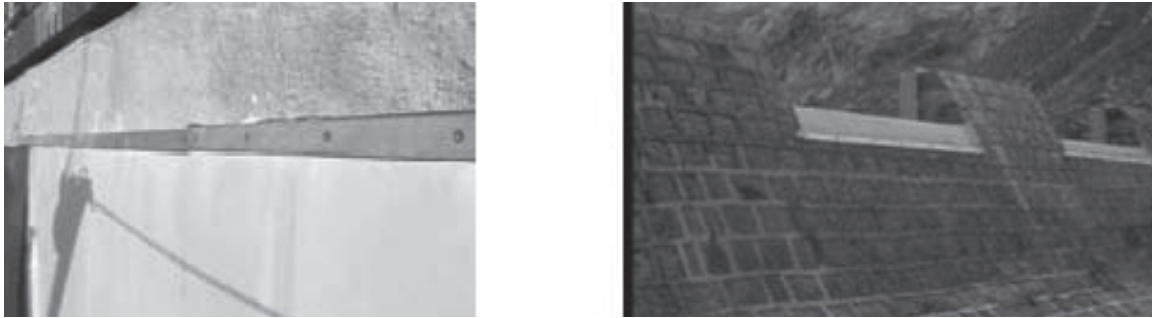


Fig. 92 and 93

Top perimeter seal above water level (Publino, Italy 1989, at left) and watertight top seal (Lago Miller spillway, Italy 1976, at right). The stresses on the geomembrane at spillway and horizontal surfaces, and the resistance of the geomembrane to floating objects during floods, should be considered

Unless the height of the covered face section is only a few metres, it must be noted that the geocomposite or geomembrane should never be anchored only at crest, as the stresses due to the dead weight are unacceptable over the long term.

Anchorage at the lateral periphery of the dam and at the heel is designed to hold the sealing layer in place and to avoid by-passing by water. Anchorage is designed to suit the water head. Anchorage can be made on the face of the dam or on a perimeter concrete beam.

Anchorage is made with flat stainless steel batten strips compressing and clamping the geomembrane. The efficiency of the seal depends on the extent and evenness of compression. To achieve even compression over the entire length of the anchorage, the batten strip must be designed to combine flexibility, which assures the contact with the underlying surface, and rigidity, which assures capability to achieve the sealing. Flexible bedding strips of rubber gasket, on one or both sides of the geomembrane and on top of the dam face, splice plates at abutting batten profiles and a smooth plane surface are necessary to distribute compression. The anchoring system must assure that compression will be maintained over the life time of the sealing system. Two

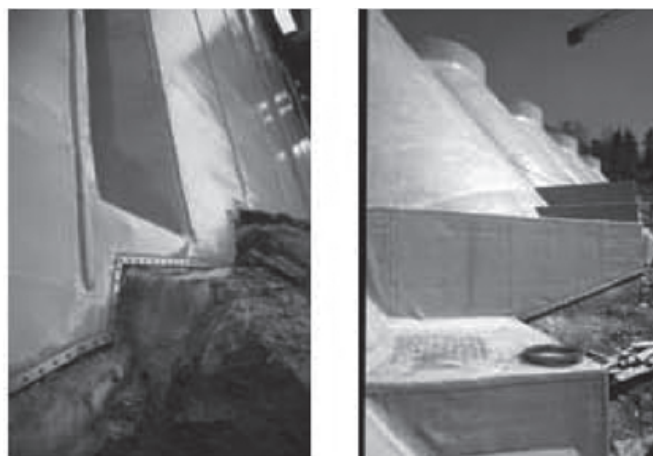
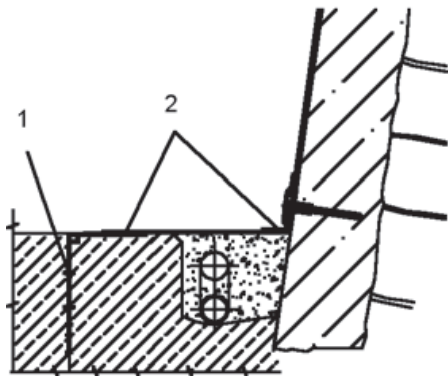


Fig. 94 and 95

Bottom perimeters seals (Scais, Italy 1993, and Pian Sapejo, Italy 1990)

compound chemical anchors are typically used to anchor the batten strips into the dam but expanding mechanical anchors are also suitable. The geotextile is removed from the geocomposite at the positions of the watertight seal, to avoid water infiltrating by capillarity action through the geotextile layer if not removed.

As an alternative to the clamping device of the perimeter joint, the geomembrane can be welded onto a synthetic waterstop, which is embedded in the concrete of the dam, in a newly constructed dam, or on a beam, constructed at heel for rehabilitation measures.



1. Waterstop
2. Geomembrane welded to waterstop and to geomembrane lining the upstream face

Fig. 96 and 97

Bottom perimeter seal by welding PVC geomembrane to waterstop (Herbringhauser, Germany 2004)

At joints in the concrete, the peripheral anchorage must achieve a sealed connection between the impervious geomembrane sealing system and the waterstop in the joint. The most effective results have been obtained either with the waterstop clamped together with the geomembrane or the waterstop seamed to a strip of geomembrane which is then connected to the main geomembrane. Another option consists of the waterstop and the geomembrane terminating in a rebate filled with flexible expansive watertight material, such as epoxy resin. Results have been variable, depending on the type of filling material.



Fig. 98 and 99

Rebate filled with epoxy resin (Chartrain, France 1993, left). Grouting of joint to intercept the embedded waterstop (Midtbotnvatn, Norway 2004, right)

Another option consists in sealing by grouting the space in the joint between the perimeter seal of the geomembrane on the upstream face and the embedded waterstop (Vale do Rossim, Kadamparai, Hohenwarte).

When anchor bolts penetrate the geomembrane the infiltration of water has to be prevented. Either the bolt heads are covered with mastic, synthetic resin etc. or a strip or patch of the same synthetic material as the geomembrane is placed to overlap the anchorage system and is heat-welded to the geomembrane. Another possibility is to create a watertight penetration where a combination of washers, gaskets and nuts compress the geomembrane as in a perimeter seal.

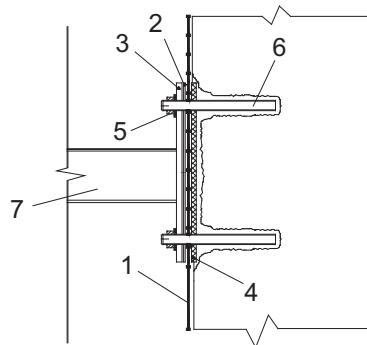


Fig. 100
Watertight penetration

- | | |
|----------------|--------------------|
| 1. Geomembrane | 5. Bolts |
| 2. Gasket | 6. Anchors |
| 3. Steel plate | 7. Steel structure |
| 4. Steel plate | |

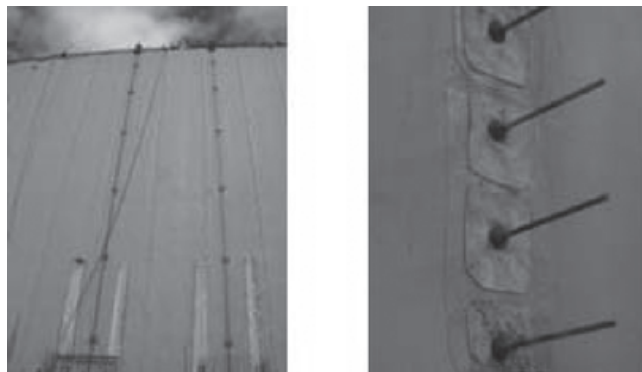


Fig. 101 and 102

Watertight penetrations for the reinforcement of new walls of the outlets (Beli Iskar, Bulgaria 2002)

All anchoring devices such as dowels, bolts, clamping profiles, screws should be of stainless steel. They shall be corrosion resistant against dissolvable chemical substances from the concrete dam or other cement products as well as from those in the reservoir water.

Elastic bedding such as rubber, foam rubber, neoprene etc. and water stops must be resistant to contact with the anchorage system, the geomembrane and the dam material. They should have similar durability as all the other parts of the GSS.

5.4.8. Covered geomembrane and cover layer

From the data base, there are no circumstantiated cases of covered geomembranes on the upstream face of concrete and masonry dams. Light concrete covers, anchored at crest or through watertight penetrations, are possible.

5.5. INSTALLATION TECHNIQUES

5.5.1. In the dry

The general technique to install a geomembrane system either on a new dam or an existing one for rehabilitation is quite similar. In both cases the geomembrane sealing system is installed on the completed and prepared upstream dam face.

To achieve a good connection between the dam surface and the geomembrane sealing without bubbles, folding or tension, it is good practice to avoid installation of the geocomposite at temperatures exceeding + 35 °C and below + 5 °C.

All installation is executed from the dam crest using winch operated platforms. Very rarely a scaffolding covering the upstream face is used. The perimeter sealing is usually performed by workers standing on the ground.

The geonet drainage layer and the geomembrane/geocomposite are installed directly onto the upstream face of the dam. The surface of the dam should be cleaned of dirt and loose particles. Major honeycombs, damaged and deteriorated areas should be repaired and their dimensions are to be evaluated together with those of the selected geomembrane and of additional layers such as geotextiles and geonets. The same evaluation applies to the construction joints in the surface and all sort of cracks: in most cases they do not need to be previously sealed since they are bridged by the GSS. In principle it is not necessary to prepare an even and smooth base of the sealing layer, since the geotextile and the geonet provide an antipuncturing protection layer. Only sharp protrusions and edges shall be removed to avoid stress concentration, which could result in damage to the geomembrane. As the antipuncturing and drainage layer are defined to suit the smoothness of the subgrade and maximum water head, it is extremely important to define in advance the admissible roughness. A useful tool can be the reference surfaces provided by the International Institute for Concrete Repair (USA).



Fig. 103

Antipuncture geotextile on rock masonry section (lower), drainage geonet on concrete section (upper) at Illsee Dam, Switzerland 1996

After preparing the dam surface, the anchorage system is installed vertically to fasten the sealing layer onto the dam face. The spacing between the vertical profiles depends from the design wind speed, the size of the rolls of geocomposite and relevant weight, the type of equipment available, etc. A spacing of more than 8 m is not recommended to avoid displacement, waving, formation of sagging and wrinkles

in the geocomposite and also difficulties during construction because of the large surface and heavy weight of the geomembrane roll which has to be handled by workers on suspended platforms. Holes for anchors are drilled into the surface of the dam to depths which allow safe anchorage. The spacing and dimensions of the anchors depend on the criteria as discussed in Chapter 4 at 4.3.6. The stainless steel threaded dowel anchor rods are placed together with the lower steel profile of the clamping device. To fix the bolts, two compound chemical or epoxy resin are normally used. To equalise and smooth the area where the clamping device is placed, epoxy mortar and layers of gaskets are usually installed. Creation of additional drainage compartments in the surface of the geomembrane sealing system is achieved by watertight lines consisting of batten strips and gaskets or just gaskets as they have to resist the limited hydrostatic pressure which may develop in the drainage system behind the geomembrane.

Geonet is used as optional additional drainage layer and is fastened by impact anchors drilled into the face. Use of shot nails is not recommended as there is no possibility of controlling their embedment, and if protruding from the dam face they may cause puncturing of the geomembrane during operation of the reservoir. At the lower end of the geonet a drainage hole is drilled through the dam towards the downstream toe or a drainage gallery to allow the drainage of water collected in the geonet. A steel plate spacer in front of the drainage hole avoids the geomembrane intruding into the hole by the water pressure and blocking it.

In accordance with a pre-established installation plan, rolls of geocomposite / geomembrane are custom manufactured or cut, to preferably cover the entire height of the dam at each station, negating the need for horizontal joining of rolls.

The geocomposite sheets are lowered down from the dam crest, using special hoisting and unrolling devices such that two adjacent panels overlap the clamping device for a sufficient width. Provisional temporary anchorage at the dam crest and along the fastening profiles minimises elongation due to dead weight and uplift by wind. Temporary tack welds, used to keep the unrolled panels in position, shall be followed in the quickest reasonable time by permanent welding. After having the geocomposite in the exact position, the geomembrane is placed on top of the lower profile and secured and tensioned with the upper profile. Thereafter, the adjoining geocomposite sheets are seamed together. The welding can be made by double track automatic welding or by single track manual welding depending on the installation method. It is important to note that use of an automatic welding machine is not possible near mechanical fastenings as their presence prevents the insertion of the second pair of rolls behind the geomembrane. All seaming shall be executed in dry temperate conditions i.e. not in rain or in cold temperatures, unless an effective shelter is provided.

The geomembrane is installed, as far as possible, without any horizontal joints from the dam crest to the dam heel. During the placing and anchoring of the geocomposite on the dam face, the geocomposite is held at the crest without being permanently fastened. Thereafter, the geocomposite is fastened below the crest and at the abutment perimeters by a simple clamping device with flat steel profiles. At the dam heel, the geomembrane is watertight fastened either on the lower edge of the dam with a simple flat steel clamping profile or on top of the concrete beam also with a simple clamping profile. Alternatively, in case of a newly constructed dam,

water stops or strips of geomembrane can be embedded in the concrete of the dam at the abutment perimeter and the heel of the dam, which are welded together with the geomembrane to provide a watertight connection between the geomembrane sealing and the dam.



Fig. 104 to 106

Installation can be performed in one summer campaign (Publino arch dam, Italy 1989), or be staged over the years to minimise impact on operation (Scais buttress dam, Italy, from 1993. Pumped storage reservoir)

5.5.2. Underwater

The above described installation techniques are normally done in dry condition. However, restrictions to lower the reservoir for rehabilitation works may require to perform the installation under water. The underwater installation has been successfully performed in the rehabilitation of Lost Creek double curvature gravity dam (USA, 1997). Conceptually the technique used is the same patented system with stainless steel profiles which fasten and pretension the geomembrane as described for the exposed geomembrane installation in the dry. Generally the surface of the dam is more rough since levelling is difficult, however, increased thickness of the geotextile protection layer and the geonet can balance this. The unrolling of the geocomposite sheets is preferable from the bottom to the top. Cables are installed on the dam face to allow the divers correctly positioning and aligning the sheets. As heat welding is at present not possible under water at reasonable costs, geocomposite sheets are joined by patented mechanical watertight joining with stainless steel profiles. Typically, mechanical joining coincides with the anchorage system.

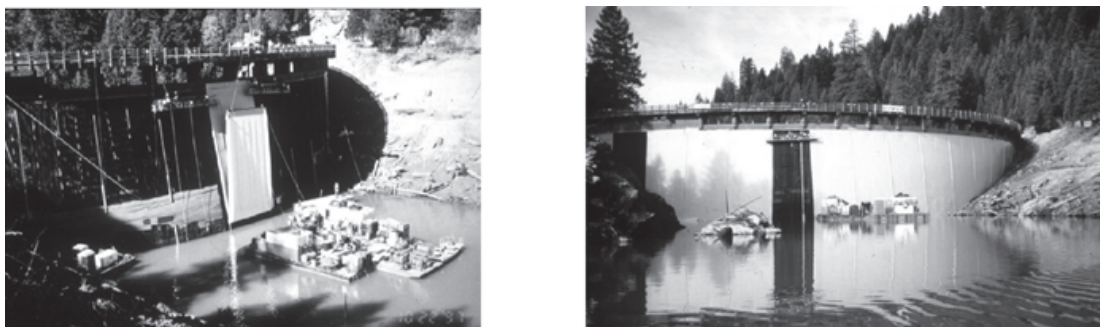


Fig 107 and 108

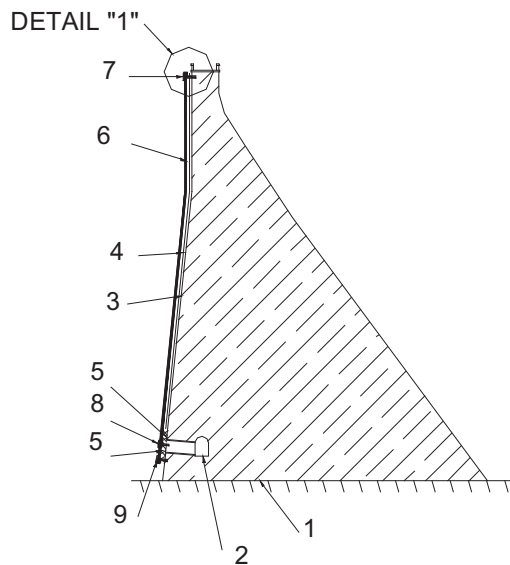
Lowering PVC panel for underwater installation (Lost Creek, USA 1997)

5.6. TYPICAL EXAMPLES

5.6.1. Rehabilitation of masonry dams, exposed PVC geomembrane, dry installation

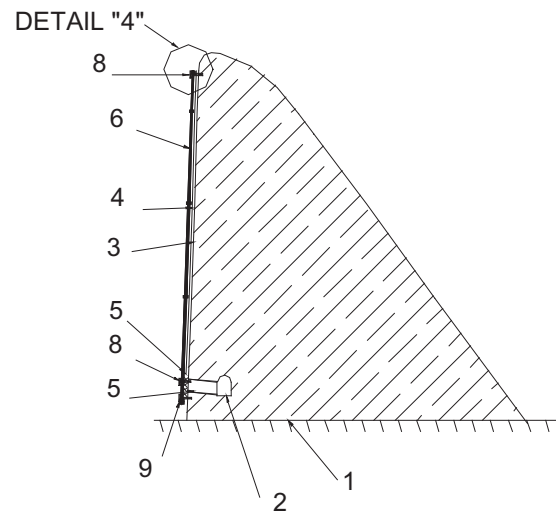
Appendix 1: Kadamparai Dam, India 2004

Current section



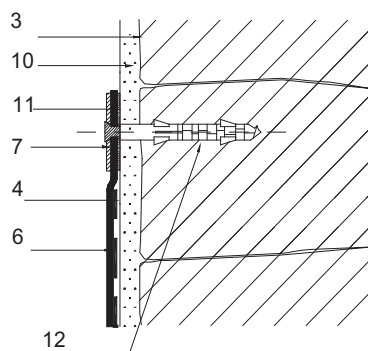
1. Rock foundation
2. Drainage gallery
3. Stone masonry upstream face
4. Anti-puncturing geotextile 2000 g/m²
5. Drainage geonet
6. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
7. Top fixation (see Det. 1), non submersible
8. Primary perimeter seal (see Det. 5/b)
9. Secondary perimeter seal (see Det. 5/c)

Spillway section



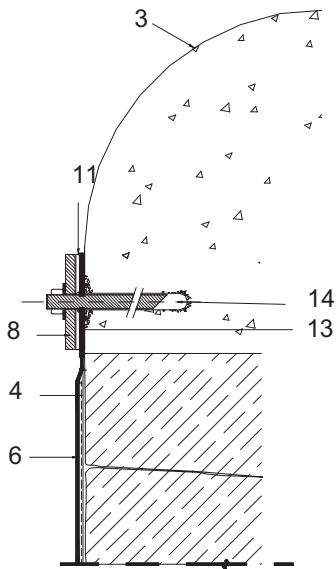
1. Rock foundation
2. Drainage gallery
3. Stone masonry upstream face
4. Anti-puncturing geotextile 2000 g/m²
5. Drainage geonet
6. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
8. Top fixation (see Det. 4), submersible
8. Primary perimeter seal (see Det. 5/b)
9. Secondary perimeter seal (see Det. 5/c)

DETAIL "1"



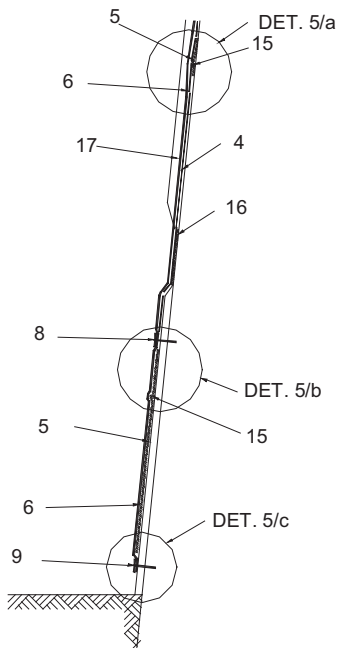
3. Upstream face of dam
10. Levelling shotcrete
4. Anti-puncturing geotextile 2000 g/m²
6. PVC geocomposite
11. Rubber gasket
7. Top fixation - Stainless steel flat profile
12. Impact and expand anchor

DETAIL "4"



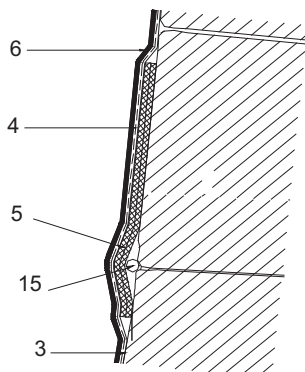
- 3. Upstream face of dam at spillway
- 13. Epoxy bedding mortar
- 4. Anti-puncturing geotextile 2000 g/m²
- 6. PVC geocomposite
- 11. Rubber gasket
- 8. Top fixation - Stainless steel flat profile
- 14. Chemical anchor

ANCHORING AT BOTTOM



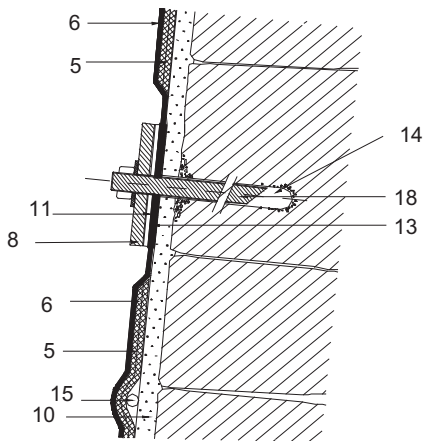
- 15. Fibre optic cable
- 5. Drainage geonet
- 4. Anti-puncturing geotextile 2000 g/m²
- 6. PVC geocomposite
- 16. Anti-puncturing geotextile and geonet overlapping for transition
- 17. Tensioning profile
- 8. Primary perimeter seal
- 9. Secondary perimeter seal

DETAIL "5/a"



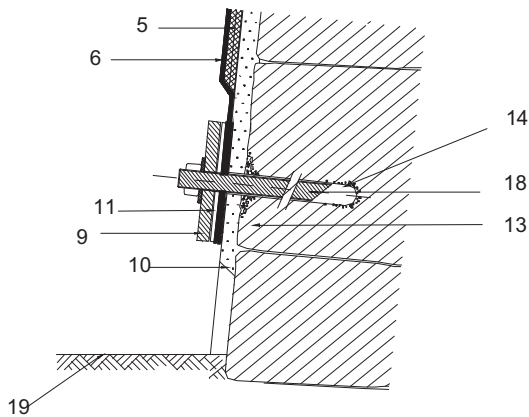
- 3. Stone masonry upstream face
- 15. Fibre optic cable
- 4. Anti-puncturing geotextile 2000 g/m²
- 5. Double layer of drainage geonet
- 6. PVC geocomposite

DETAIL "5/b"



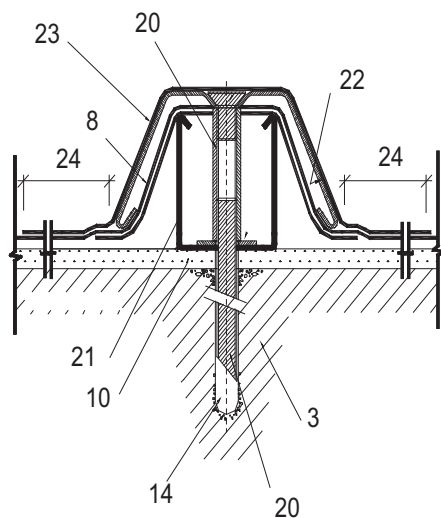
- 10. Levelling shotcrete
- 15. Fibre optic cable
- 5. Double layer of drainage geonet
- 6. PVC geocomposite
- 14. Chemical anchor
- 18. Stainless steel threaded rod
- 13. Epoxy bedding mortar
- 11. Rubber gasket
- 8. Primary perimeter seal - Stainless steel flat profile

DETAIL "5/c"



- 19. Ground line
- 10. Levelling shotcrete
- 5. Double layer of drainage geonet
- 6. PVC geocomposite
- 14. Chemical anchor
- 18. Stainless steel threaded rod
- 13. Epoxy bedding mortar
- 11. Rubber gasket
- 9. Secondary perimeter seal - Stainless steel flat profile

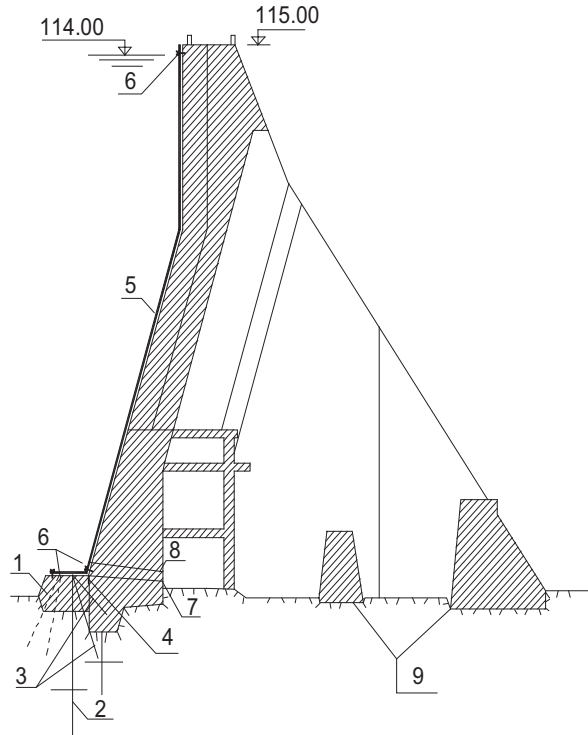
PATENTED TENSIONING PROFILE



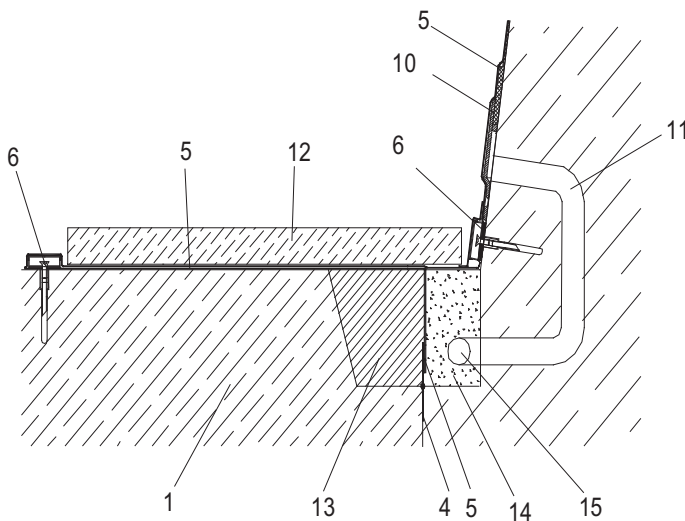
- 3. Stone masonry upstream face
- 14. Chemical anchor
- 20. Stainless steel anchor system
- 10. Strip of levelling shotcrete
- 21. Stainless steel internal profile
- 6. PVC waterproofing geocomposite
- 22. Stainless steel external profile
- 23. PVC cover strip (2.5 mm PVC geomembrane)
- 24. Welding

5.6.2. Rehabilitation of buttress dam subject to AAR, exposed PVC geomembrane, dry installation

Appendix 1: Pracana Dam, Portugal 1992



1. Upstream plinth
2. Impervious grout curtain
3. Chemical grouting
4. Waterstop
5. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
6. Watertight perimeter seals
7. Drainage of foundation water
8. Drainage outlet of upstream geocomposite
9. Concrete struts

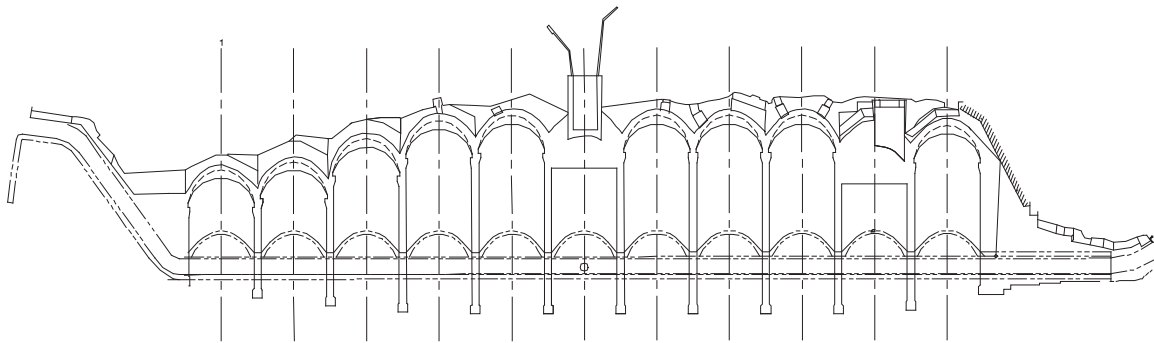


10. Upstream PVC geocomposite anti-intrusion drainage plate
11. Drainage discharge pipe
6. Watertight perimeter seals
5. PVC geocomposite on new concrete plinth
12. Concrete plate
1. New concrete plinth
13. New concrete second phase
4. Waterstop
5. PVC geocomposite
14. Porous concrete
15. Drainage collector

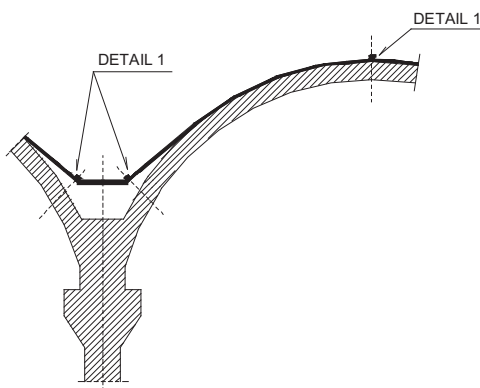
5.6.3. Rehabilitation of multiple arch dam, exposed PVC geomembrane, dry installation

Appendix 1: Butgenbach Dam, Belgium 2004

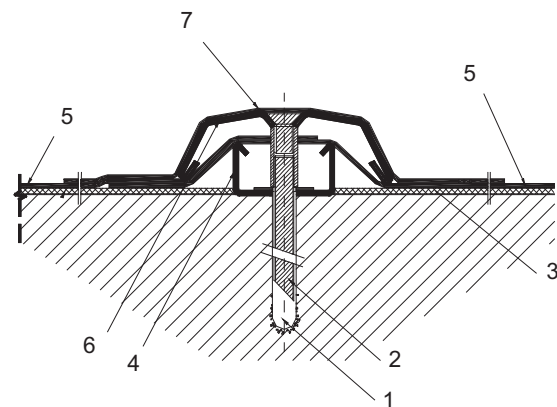
PLAN



CROSS SECTION OF ARCH



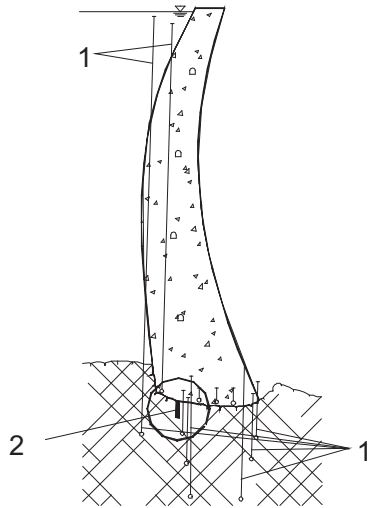
DETAIL "1"
(VERTICAL FIXATION)



1. Chemical anchor
2. Stainless steel anchor rod
3. Geonet
4. Stainless steel internal profile
5. PVC waterproofing geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
6. Stainless steel external profile
7. PVC cover strip (2.5 mm PVC geomembrane)

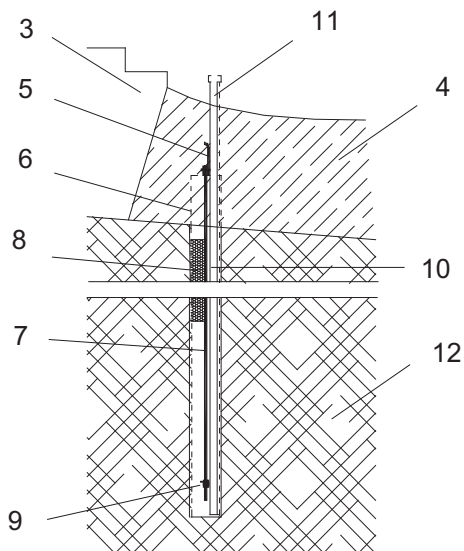
5.6.4. New elastic cut-off, LLDPE geomembrane

Appendix 1: Schlegeis Dam, Austria 1981



- 1. Uplift cells and piezometers
- 2. New elastic cut-off (see detail)

DETAIL OF ELASTIC CUT-OFF

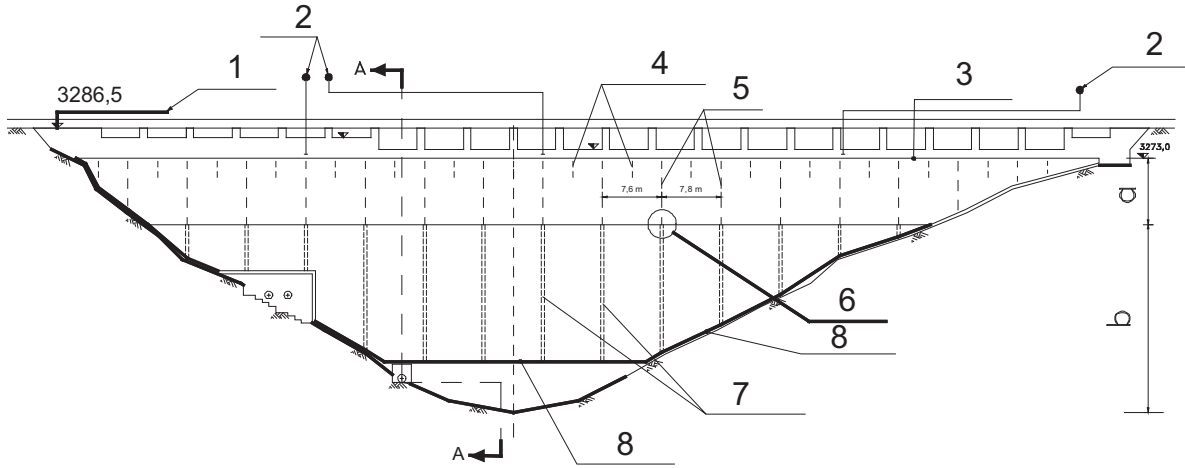


- 3. Old concrete dam
- 4. New concrete floor
- 5. Copper sheet
- 6. S-shaped pipe
- 7. Geomembrane
- 8. Gravel + polyurethane foam
- 9. Steel angles
- 10. Plastic material
- 11. Vertical pipes for future injections
- 12. Foundation

5.6.5. Rehabilitation of arch dam, exposed PVC geomembrane, underwater installation

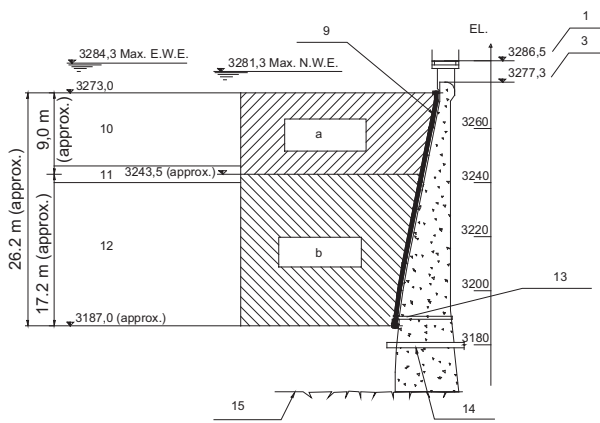
Appendix 1: Lost Creek Dam, USA 1997

DAM UPSTREAM FACE



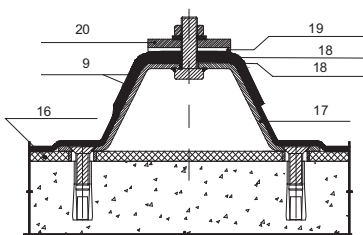
- | | |
|----------------------------|--------------------------------------|
| a. Dry installation | 4. Intermediate dry profiles |
| b. Underwater installation | 5. Primary dry profiles |
| 1. Roadway deck | 6. Transition dry-underwater profile |
| 2. Ventilation pipes | 7. Underwater profiles |
| 3. Upper perimeter seal | 8. Lower perimeter seal |

SCHEMATIC CROSS SECTION - El. in feet



- | |
|--|
| a. Dry installation |
| b. Underwater installation |
| 1. Roadway deck |
| 3. Spillway crest |
| 9. Waterproofing liner PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m ² geotextile) |
| 10. Upper section: perimeter seal, primary profiles, intermediate profiles, lower perimeter seal |
| 11. Transition section |
| 12. Underwater section: profiles, lower perimeter seal |
| 13. Drainage discharge |
| 14. Outlet pipe (existing) |
| 15. Assumed foundation profile |

SECTION C-C (underwater) (sous l'eau)



- | |
|----------------------------------|
| 16. Geonet |
| 17. Stainless steel profile |
| 18. Biadhesive gasket |
| 9. PVC geocomposite |
| 18. Biadhesive gasket |
| 19. Rubber gasket |
| 20. Stainless steel batten strip |

6. GEOMEMBRANES FOR ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS: NEW CONSTRUCTION, REHABILITATION AND INDUCED JOINTS

Out of approximately 290 RCC dams built as of 2006, there are 34 which incorporate a geomembrane as a watertight element. Geomembranes have been used to cover the entire face, exposed or covered, or to waterproof joints or cracks. Those 34 RCC dams are among the highest (Miel 1, Colombia, 188 m, 2002) and largest (Olivenhain, USA, 1 500 000 m³), have been built in seismic areas and in general provide outstanding performance in terms of seepage control when compared to RCC dams without geomembrane.

Some of the installations have already exceeded 20 years of service, and all of them show excellent performance. By large the type of geomembrane mostly used is PVC (31 out of 34).

Table 31
Geomembranes in RCC dams

GEOMEMBRANE ON	POSITION	TOTAL	PVC	HDPE	LLDPE
Entire face	Exposed	11 + 1 unknown	11	0	0
	Covered	17	15	1	1
Joints	Exposed	3	3	0	0
	Covered	0	0	0	0
Cracks	Exposed	3*	3*	0	0
	Covered	0	0	0	-0
Largest installation [m ²]		38 880	38 880	n.a. **	n.a. **
Highest dam [m]		188	188	n.a. **	40
Highest elevation [m]		1160	1160	n.a. **	220
Oldest installation was in year		1984	1984	n.a. **	1992
Most recent installation was in year		2006	2006***	n.a. **	1992

* One installation made on same dam where geomembrane had already been installed on joints.

** not available.

*** Installation of exposed and covered systems continuing up to date.

This chapter discusses the application of geomembranes in the construction and repair of RCC dams.

As many parts are similar to those relevant to embankment dams and gravity dams, reference is made to the appropriate paragraphs. The same applies for rehabilitation of cracks and failing joints.

6.1. RANGE OF APPLICATIONS

6.1.1. Applications in construction of new dams

The construction of RCC dams is economical and has many advantages; however the seepage through RCC dams may be a problem. In some cases, seepage emerging from the downstream face of the dam may be acceptable from a structural stability perspective, but may not be acceptable for public perception. In the past, water leakage at the downstream face of a dam has caused the public to react with alarm. This reaction is enhanced when the public compares the appearance of the concrete finish on the downstream dam face with more familiar conventional concrete structures.

At present one trend for designing RCC dams is based on low cementitious content concrete mixes. They offer a wider range of ambient temperatures when placing RCC, reduced tensile stresses resulting from restrained thermal contraction, easier construction in general. A low cementitious content ($<120 \text{ kg/m}^3$) means a less strong RCC mix, which will perform the static function of the dam body with acceptable factors of safety.

RCC mass is not as homogeneous as it is expected to be due to inherent characteristics of the construction procedures. Special consideration could be given to the variability of the characteristics of RCC mass, such as permeability, due to construction processes. They may result in segregated and low density zones.

The key problems to be solved for RCC dams are the relatively high permeability of the dry concrete with low amount of cement, the permeability of lift construction joints, and the high possibility of a separation joint at contact between RCC and conventional concrete on the upstream face, which may develop due to the thermal constraints.

RCC dams constructed with high cementitious content have lower permeability at lift joints. However, the lower permeability of the concrete material, which could solve the above problems, results in a relatively high permeability due to the increased thermal cracking of the non-reinforced concrete.

The RCC with high cement content is made less attractive because of complicated construction with very stringent controls of the temperature of the concrete mix during mixing and placing, more strict specifications and control of temperature, even with cooling systems installed, special care for the horizontal lift joints and their subsequent treatment to insure imperviousness, special treatment provision for any «cold» joint and more stringent control procedures and precautions.

The main problem of seepage through an RCC dam is a stability problem and the high risk of deterioration of the RCC by leaching out of cement by the seeping water. The rupture in 2004 of Camara RCC dam in Brazil, built in 2002, shows that seeping water may have tragic consequences.

The means for overcoming the above listed problems are to provide watertightness to the RCC dam by a separate independent watertight element on the upstream face. The waterproofing function is separated from the static function. As a result, more sophisticated upstream facing systems have been incorporated in recent RCC dams with increasing success. Conceptually, there are two available solutions, the solution with an upstream concrete facing, and the solution with a synthetic geomembrane facing.

Upstream concrete facings have been made by internally vibrated concrete facing placed integral with the RCC, or by vertically slip formed internally vibrated concrete facing, or by grout enriched RCC facing. A conventional concrete face, built at the same time of the RCC body, may seem a logical solution from the design point of view. Nevertheless, it entails the higher care normally associated with the placement of conventional concrete, a mix design different from that of the RCC dam body, and requires protection of the vertical induced joints against water infiltration. This involves more complicated design and the use of synthetic materials, such as embedded waterstops, or exposed watertight sealing elements. The combination and interference of RCC and conventional concrete placement complicates the entire dam construction procedure, with a significant impact on the construction schedule and on the costs of the project.

Since 1984, impermeable synthetic geomembranes prefabricated in factory have been adopted as alternative to concrete to construct the impervious upstream facing of RCC dams. Functions are clearly separated. RCC, which provides the static function, is constructed in simple, rapid and cost effective way. The synthetic geomembrane, which creates the impervious barrier, covers the entire upstream face of the dam, including contraction joints and unforeseen cracks. It is conceptually equivalent to one unique exposed waterstop. The impermeable synthetic geomembrane is attached directly on the RCC body as a separate element, at the end or even during the construction of RCC dam body, and its late installation does not interfere with construction.

This use of upstream geomembranes, in addition to providing a technically effective technique, allows savings in construction costs and times, and adopting less stringent construction and CQA procedures.

The adoption of a geomembrane system can also have significant cost benefits as compared to traditional methods to provide upstream impermeability.

Large savings can be made in all or most of the following items:

- Reduction of cement content,
- Reduction or deletion of pozzolan,
- Reduction of fly ash,
- Possibility of using for the RCC mix local material which is more easily available,
- Deletion of provisional sum for cooling ,
- Reduction of bedding mix of lift surface area,
- Deletion or reduction of upstream contraction joint waterstops,
- Reduction of the overall cost of horizontal joints treatment.

As a result, from the 2 RCC dams mentioned in ICOLD Bulletin 78 published in 1991, the number of RCC dams having a synthetic geomembrane as waterproofing element has increased to 34 dams in 2006, and more are under construction in 2007, 2008, 2009 and 2010.

6.1.2. Application in rehabilitation of RCC dams

Application of geomembrane for the rehabilitation of RCC dams started in 2000. Rehabilitation has up to date been made to seal unforeseen cracks that developed in RCC dams, and failing joints.

The application of a geomembrane in the rehabilitation of RCC dams is comparable to the application to rehabilitate conventional concrete dams as described in Chapter 5.

The design principles and the installation techniques are similar for waterproofing of induced joints in construction and for rehabilitation of cracks and failing joints, and therefore are described together.

6.2. DESIGN PRINCIPLES

6.2.1. General

In addition to what has already been discussed in general for concrete dams in Chapter 5, in RCC dams the upstream geomembrane is of particular advantage in respect to the problem of internal uplift and resulting reduced stability.

The 1995 United States Army Corps of Engineers manual is very clear that the amount of uplift to be used in design and analysis of RCC dams will be determined for each project based on *"...mix permeability, lift joint treatment, the placements techniques specified for minimising segregation within the mixture, and the treatment for watertightness at the upstream face..."*. The book *"Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation"* is a separate international authoritative source documenting the fact that *"With RCC construction, special care must be given to the horizontal joints at the interface of lift surfaces"* and that *"Special*

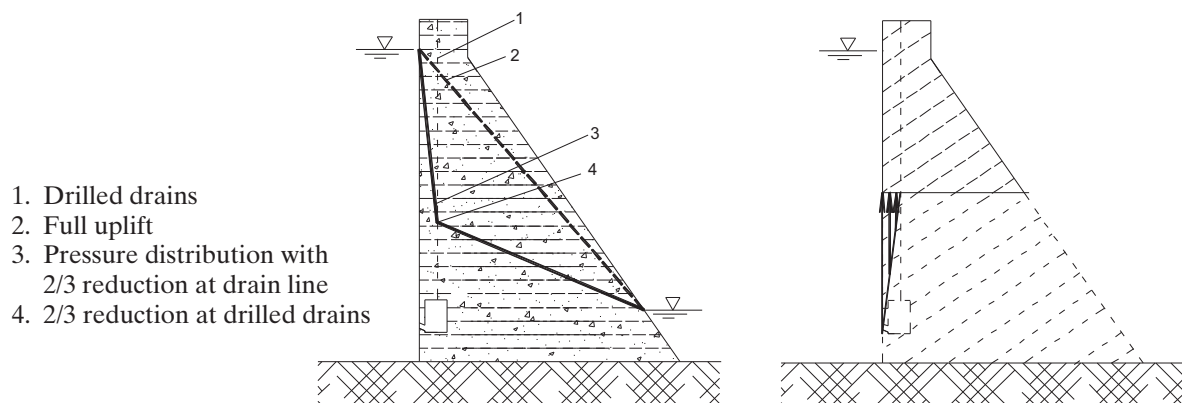


Fig. 109
Uplift reduction without upstream seepage control

seepage control measures that can be used in RCC dams include... using an elastomeric waterproof membrane at the upstream face...". In 1988 the reference suggested "With formed face drains, uplift is assumed to vary from 50% of headwater at the upstream face to zero or tailwater, as applicable, at the downstream face". When internal drilled drains are used in conjunction with an upstream membrane and face drain system, the drains are typically assumed to provide an additional reduction of up to 2/3 (66%) at the line of the drains. These reduction figures vary depending on the country.

The uplift reduction is therefore a function of the watertightness of the upstream facing and of the efficiency of the drains. Synthetic geomembrane sealing systems have proved to be an optimum solution as regards protection against water seepage which, at the dam facings, has been reported to be virtually zero. This is due to their extremely low permeability and to the fact that their installation together with a drainage layer behind the sealing allows covering all potential points of water infiltration, lift and expansion joints, induced fissures, and cracks which could occur during the service life of the dam.

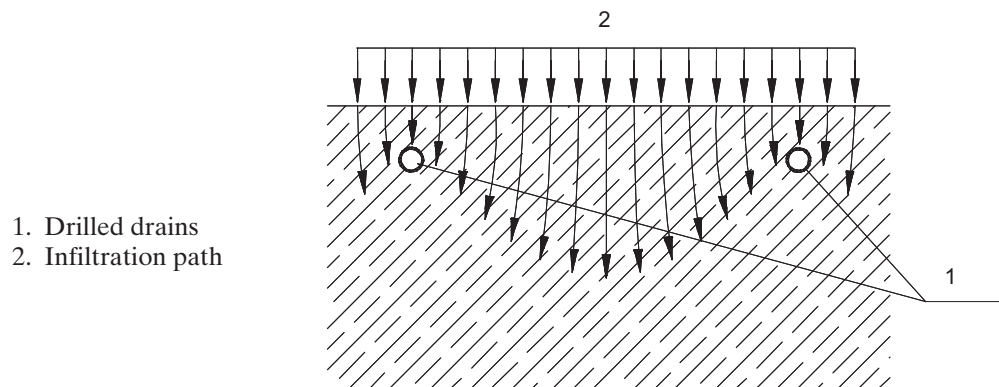


Fig. 110
Horizontal section Drilled drains do not intercept all seepage water, which enters the dam body

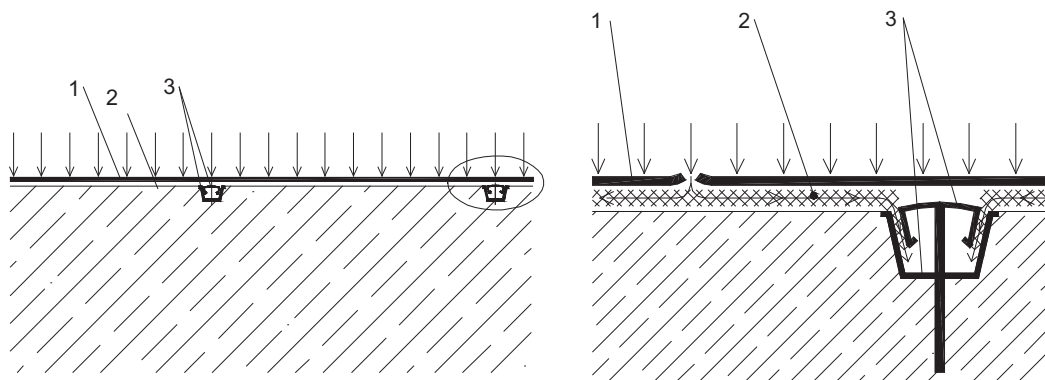


Fig. 111
Seepage water, intercepted by the face drainage layer and by the vertical drainage conduits, is conveyed to bottom collection and discharge

1. Geomembrane
2. Continuous face drainage layer
3. Patented anchorage profiles forming a vertical drainage conduit

Concerning the drainage system, while traditional methods of collecting infiltration water by vertical drains inside the RCC dams do not intercept sufficiently all water seepage paths, and therefore only a partial reduction of uplift is generally suggested, the drainage which is part of a geomembrane solution is designed in a way that the entire upstream surface is drained, and all water is taken by the drainage layer and associated collection and discharge conduits.

Therefore the drainage efficiency can be assumed to be 100% at the face. As a consequence, the reduction in uplift by drainage can be considered to be 100%.

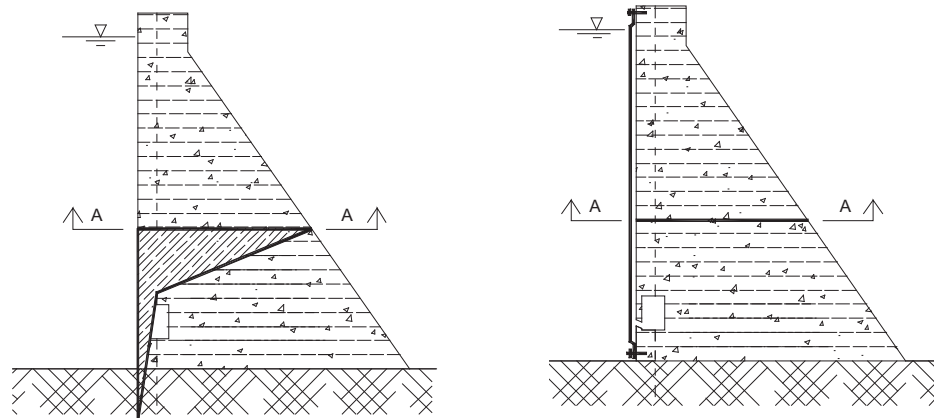
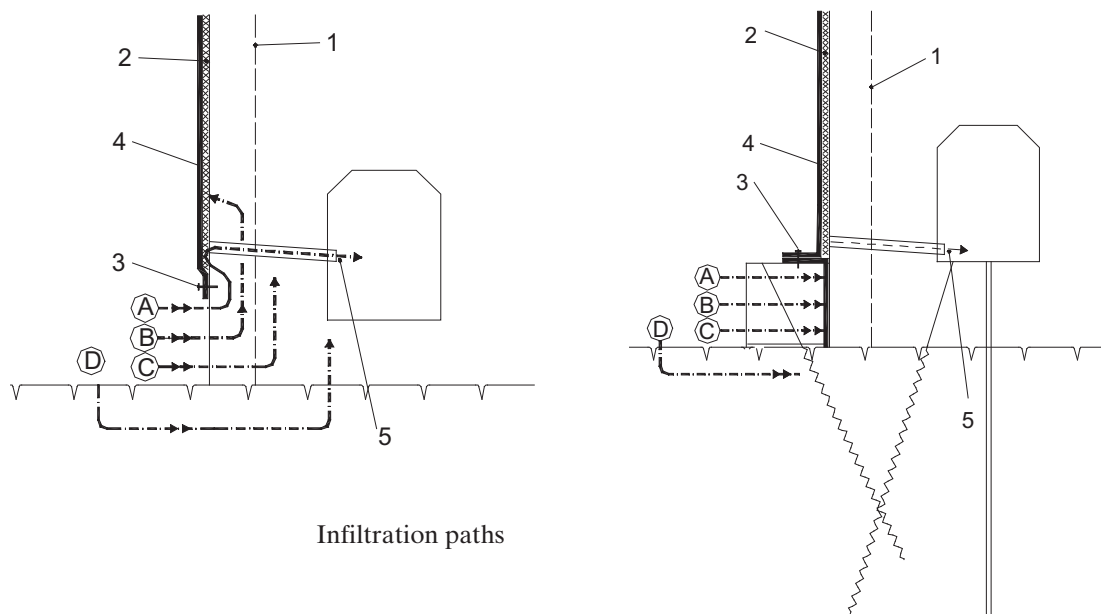


Fig. 112

Uplift at current section of dam without (left) and with (right) and upstream drained geomembrane, with a totally efficient drainage system.



Infiltration paths

1. Waterstop in joint
2. Drainage layer
3. Perimeter seal
4. Geomembrane
5. Drainage discharge

- A. Through joints of concrete
- B. Through vertical joints
- C. Through defective waterstops
- D. Through foundation

Fig. 113 and 114

Possible infiltration paths below geomembrane. Construction of a perimeter plinth with short grout curtain removes infiltration paths A, B, C, and D

The natural uplift at the dam foundation can also be reduced by the system of a tight connection of the geomembrane with a foundation sealing system such as a grout curtain or cut-off wall for controlling infiltration at the heel. The presence of a perimeter plinth at the heel of the upstream face with a short grouting curtain which will bond the plinth to the rock and will intersect the grouting curtain from the gallery, will reduce the remaining possible infiltration paths of water from the reservoir, which basically are:

- Through permeable foundation
- Through the bottom part of defective vertical joints
- Through horizontal lift joints not perfectly treated.

It should also be considered that the use of an upstream geomembrane sealing system can improve the design of the RCC mix by allowing reducing the cement and/or pozzolan content. Table 32 provides data on cement content in RCC mixes in dams where a geomembrane has been considered in the design phase (source: Water Power & Dam Construction, 1998).

Table 32
Cement/Pozzolan Content in RCC Dams with Geomembrane Sealing

DAM	COUNTRY	CEMENT	POZZOLAN
		(kg/m ³)	(kg/m ³)
Winchester	USA	104	0
Urugua I	Argentina	60	0
Concepción	Honduras	95	0
Riou	France	0	120
Siegrist	USA 5	9	34
Nacaome	Honduras	64	21
Big Haynes	USA	42	42
Burton Gorge	Australia	85	0
Spring Hollow	USA	53	53
Balambano	Indonesia	78	42

Similar to what described for gravity dams, the geomembrane sealing system for RCC dams is divided in two main groups:

- Exposed sealing system
- Covered sealing system.

6.2.2. The exposed sealing system

The exposed solution, which is patented, consists of the geomembrane sealing which is installed on the upstream face of the dam and therefore directly exposed to the water of the reservoir and to the environment.

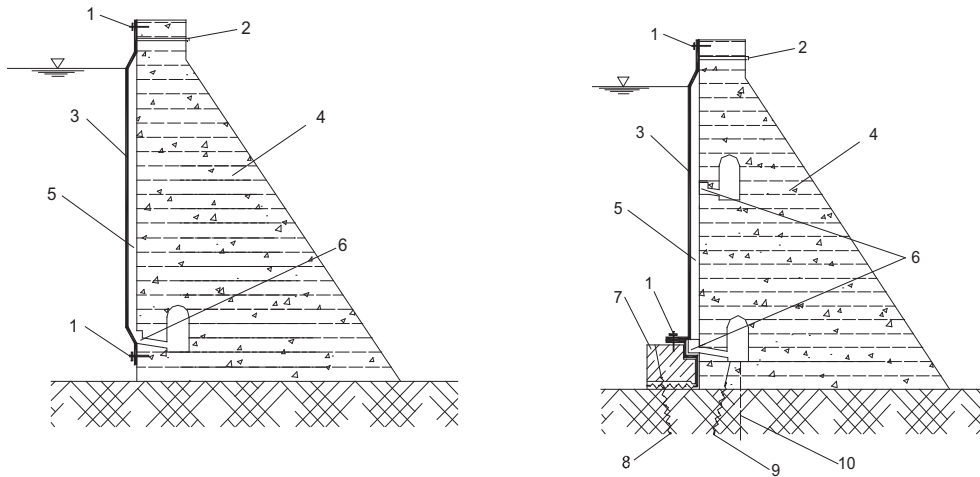


Fig. 115 and 116

Conceptual cross sections of the exposed system without and with plinth

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Perimeter seals 2. Ventilation pipe 3. Waterproofing geocomposite 4. RCC lifts 5. Vertical anchorage & drainage for geocomposite | <ol style="list-style-type: none"> 6. Box drain for perimeter drainage collection system 7. Perimeter plinth (optional) 8. Contact grouting 9. Grout curtain 10. Foundation drainage |
|---|---|

6.2.3. The covered sealing system

The covered solution, which is patented, consists of the geomembrane cast on pre-cast panels which are used as formwork for RCC placement and with the geomembrane which results permanently embedded except for the portion at the open joints of the concrete panels, which remains fully exposed to the reservoir's water.

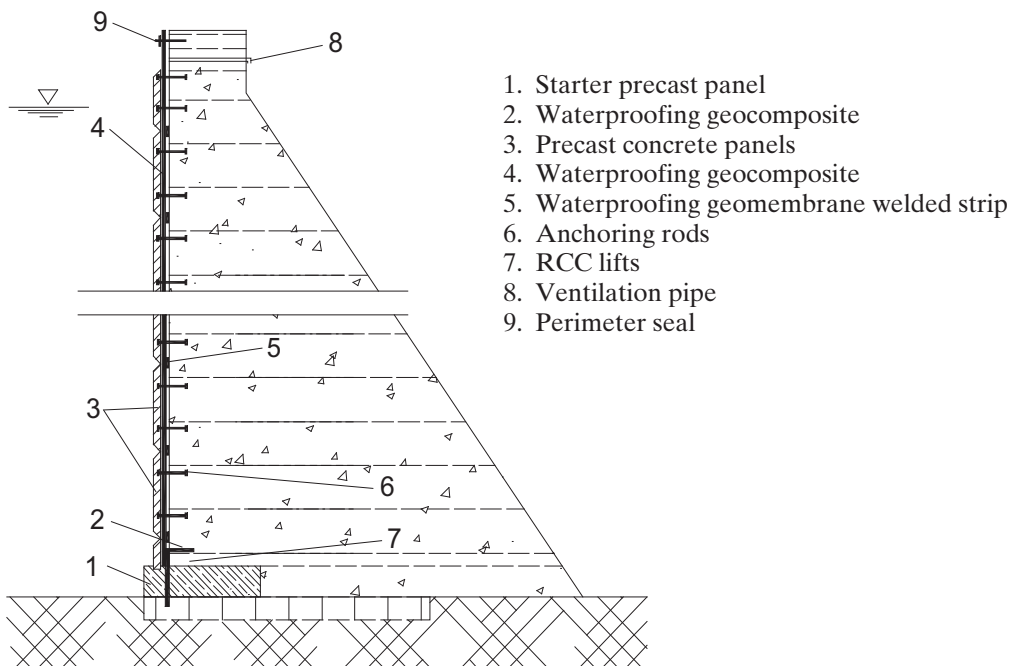


Fig. 117

Conceptual cross section of the covered system

6.2.4. Comparison of the two systems

In both solutions, the impervious geomembrane intercepts any water infiltration over the entire waterproofed surface, as it covers and permanently waterproofs the RCC face and all lift joints and construction joints. From the watertightness point of view the geomembrane is one large waterstop covering the entire face, while in conventional methods for constructing RCC dams the watertightness is required only at construction joint and is usually provided by PVC waterstops. The presence of the geomembrane, avoiding any water infiltration in the horizontal lift joints of the dam, significantly reduces many design constraints, such as the need of a conventional concrete layer on the upstream face, bedding mixes or special paste treatment of the joints. This leads to the possibility of placing one RCC mix over the entire cross section of the dam without the interference due to placing a bedding mix on horizontal lift joints and conventional concrete at the upstream face. Although the horizontal lift joints are not critical for the watertightness of the dam, a bedding mix may still be needed for shear strength and dam stability. In some projects an upstream face bedding mix was still required, but only for a very limited thickness against the formwork of the upstream face. Its use was mainly dictated by the need to achieve good compaction of the RCC mix at the dam face assuring a good finish on the upstream concrete surface. RCC concrete dams without a bedding mix on the upstream face and with a geomembrane only was realised for the dams of Concepción and Nacaome (Honduras), Riou (France), Balambano (Indonesia), and in the covered system at Penn Forest and Buckhorn (USA).

The exposed solution provides some additional technical and economical advantages as compared to the covered solution. One of the technical advantages is the presence of an efficient face drainage system. A face drainage system is advantageous at the design stage, and during the entire service life of the impervious geomembrane.

At the design stage, the presence of a face drain allows the reduction of design uplift which is widely accepted by international experts. The advantages that the presence of a face drainage system can provide during service are related to the following aspects:

- **Monitoring:** through the measurement and control of the quantity of drainage water, the drainage system allows monitoring of the performance of the waterproofing system on a continuous basis by measuring fluctuations with respect to an assessed average or “normal” quantity corresponding to satisfactory behaviour of the dam and its impervious liner. Consequently, a drained upstream facing system permits more accurate monitoring and control of seepage. With an appropriate design, monitoring and locating a potential malfunction can be very accurate, thus allowing easy and quick access and repair.

- **Safety of the dam:** a drained upstream facing system has the capability of avoiding an accumulation of water behind the waterproofing liner should accidental damage occur to the impervious geomembrane. It can remove water migrating through lift joints in the body of the dam, thus lowering saturation levels and pore pressures in the dam, with beneficial effects on the stability safety factors, on AAR phenomena, and on appearance at the downstream face. Safety at the lift joints is increased, and build-up of uplift pressures in the dam itself is avoided.

- Safety of the sealing layer during rapid draw-down of the reservoir: the drain avoids water build-up behind the liner which assures that at dewatering the impervious liner will not be subject to an unbalanced backpressure.

Out of all the examined RCC dams incorporating a synthetic membrane liner, 17 adopt the exposed system, and 17 the covered system. The two configurations imply different philosophy, construction procedures, and maintenance.

6.3. LOADING

The various loading as discussed in Chapter 3 apply also to RCC dams. Loading caused by the weight of the geomembrane on the vertical dam face creates tension forces which have to be relieved by an adequate anchorage system. In general the considerations are the same as made in Chapter 5 for gravity dams.

6.4. GEOMEMBRANE SEALING SYSTEM

6.4.1. General

Depending on whether it is exposed or covered the principal design requirements of the geomembrane sealing system are:

Table 33
Design requirements

Requirements	Exposed GSS	Covered GSS
The watertightness, provided by the geomembrane and its tight connection with the dam structure	Provided	Provided
The provision of drainage behind the geomembrane to collect any leakage water through the dam	Provided	Preferable option
Ventilation behind the dam to balance atmospheric pressure fluctuations, to avoid building up of vapour pressure and to allow free discharge	Provided	Preferable option
The anchorage of the geomembrane	Provided	Provided
The external cover layer for protection of the geomembrane	Not applicable	Provided

The exposed system, as described in ICOLD Bulletin 78 published in 1991 for Riou dam (1990), has been adopted on all RCC dams with exposed geomembrane. The system anchors a geomembrane sealing system to the entire upstream face. The geomembrane is installed over the completed RCC lifts, covering the entire face of

the dam. In most recent applications also the grouting beam at the dam's heel is sealed with a geomembrane to prevent seepage at joints and to watertight connect the geomembrane on the upstream face of the dam with the grout curtain.

The exposed geomembrane sealing system has the advantage of easy inspection and repair, if required.

The covered geomembrane sealing system has in addition a protection layer on top of the geomembrane.

The covered sealing system comprises:

- The sealing layer of at least 2 mm thick prefabricated geomembrane sheets which are embedded in the precast concrete panels;
- The cover layer, which is made by the concrete of the panels.

Only in most recent projects, a protection layer for the geomembrane consisting of a non-woven needle punched geotextile is used for the geomembrane; usually the geotextile and the geomembrane are assembled together in the factory and form a geocomposite; the purpose of the geotextile is to protect the geomembrane and to fasten it to the concrete of the panels.

The liner is typically a PVC geomembrane secured to the precast concrete panels during casting of the panels, by embedding of its laminated polypropylene geotextile. For the covered system, the concrete cover layer is pre-cast together with the geomembrane in the factory or at site. The panels are secured to the dam by anchor bars embedded in the RCC lifts. Joints between panels are waterproofed by welded cover strips.

6.4.2. Geomembrane

The same considerations as for concrete dams apply. The type of exposed geomembrane installed on most of the RCC projects is the same used in rehabilitation of concrete dams, consisting of a PVC geomembrane, thickness 2.5 to 3.0 mm, heat-coupled at manufacturing to a 200 to 700 g/m² geotextile. For covered systems, a 1.5 to 2.0 mm PVC geomembrane heat-coupled at manufacturing to a 200 to 700 g/m² geotextile. Now the minimum thickness is 2 mm. The geotextile must be polypropylene fibres to resist the aggression of fresh concrete, or polyester if it is not in contact with the concrete, for instance when a drainage geonet is used (Olivenhain, USA, 2002).

For the geomembrane, the matters discussed in Chapter 5 for concrete dams applies also to RCC dams.

6.4.3. Support surface and lower protection of the waterproofing geomembrane

From the waterproofing point of view, as the geomembrane has very low permeability (10^{-12} m/s), there is no need for an impermeable upstream concrete layer or bedding mix, so the support surface is typically formed directly on the RCC lifts. As RCC lifts construct a surface that is generally rougher than regular concrete, the surface is normally controlled for stability and absence of honeycombs only. Generally, the use of metal formwork is the most suitable solution to obtain a

smooth surface as their strength allows for more effective compaction of the RCC. In most cases upstream concrete and bedding mix are used to assure bond strength between lifts and to provide an additional line of defence. This bedding mix, depending on compaction method and energy, is pushed up against the formwork providing a smoother surface than the RCC mix. If surface is rough, an additional anti-puncturing geotextile may be installed, but no case has so far been reported of this being necessary.

At the location of vertical induced joints, additional support may be needed to prevent intrusion of the geomembrane into the joints. The type of support is site specific and is further described in Chapter 7.

6.4.4. Drainage and ventilation layer

As for concrete dams, drainage in RCC dams has the additional advantage of reducing the design uplift, and preventing prolonged contact of water with the lift joints.

The geotextile associated with the geomembrane provides a drainage medium. As the transmissivity of the geotextile is usually greater than the horizontal permeability of the RCC lift joints and of the RCC itself, water will “travel” within the geotextile mainly vertically and will not affect the lift joints. Risk of water from the reservoir infiltrating into the RCC face is very low. Under pressure, such as hydrostatic load, the geotextile is reduced in thickness and compaction of filaments leads to a reduced transmissivity.

Geonets provide a higher transmissivity, increase the cost of the project and may generate the perception that the dam is not performing well because of the higher rate of drained water. The selection of whether to install a geonet is a choice based on political (psychological) rather than technical considerations. Owners may want to avoid a misleading perception of the drained water in the gallery by the public.

The drainage layer has to be open at the crest for ventilation. Connection with the atmosphere is achieved either by an opening in the geomembrane above the maximum water level, or by continuing the anchoring profiles up to the crest, or by pipes embedded in the surface of the RCC lifts and exiting at the downstream face. The ventilation pipes can also ventilate downstream into the gallery, whatever is more convenient. Typically there is one ventilation pipe every 15 to 20 m horizontally.

6.4.5. Drainage collection and discharge

Bottom drainage collection is made usually by a peripheral conduit, that is positioned at the heel. The collector is a box drain embedded in the RCC lifts as they are placed or an additional strip of high transmissivity geonet as discussed in § 5.4.6.

As described in Chapter 5 for concrete dams, in order to improve monitoring of the efficiency of the geomembrane sealing system there is a tendency to divide the upstream face in smaller compartments. The division is quite practical if there are

more than one inspection gallery in the dam body. At Miel 1, Colombia, 2002, 188 m high and an upstream area of 31 500 m², where there are 6 levels of galleries, the exposed geomembrane sealing system has been divided in 149 independent horizontal and vertical compartments. Each compartment discharges separately into the related gallery.

The drainage discharge can have two conceptual configurations. Either each compartment is separately drained and discharges separately and directly into a transverse discharge pipe to a drainage gallery in the dam or at the dam heel - this allows more accurate control of the tightness of the geomembrane sealing in each compartment - or the water from the compartments is collected by box drain and is discharged by a transverse pipe to the gallery or towards downstream.

6.4.6. Anchorage system over the dam face

The geocomposite in the sealing system is anchored over the entire dam face by clamping devices in vertical parallel position. The same patented clamping system, which derives from the system adopted for rehabilitation of concrete dams, has been adopted on all RCC dams, with a slightly different configuration to accommodate site specific needs.

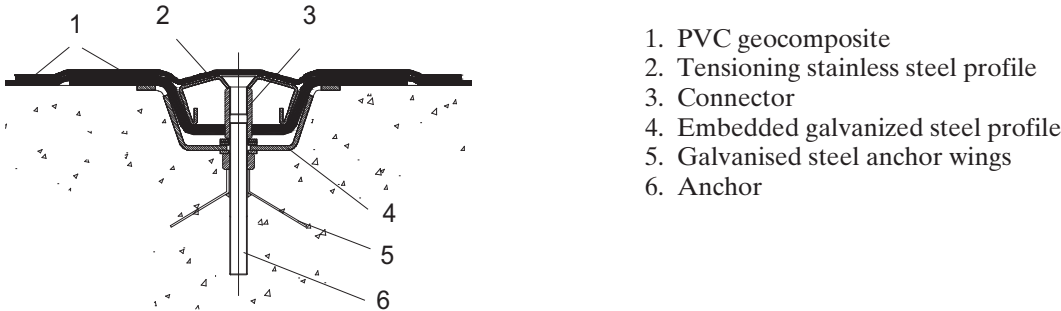


Fig. 118
Conceptual cross section of the clamping system (patented)

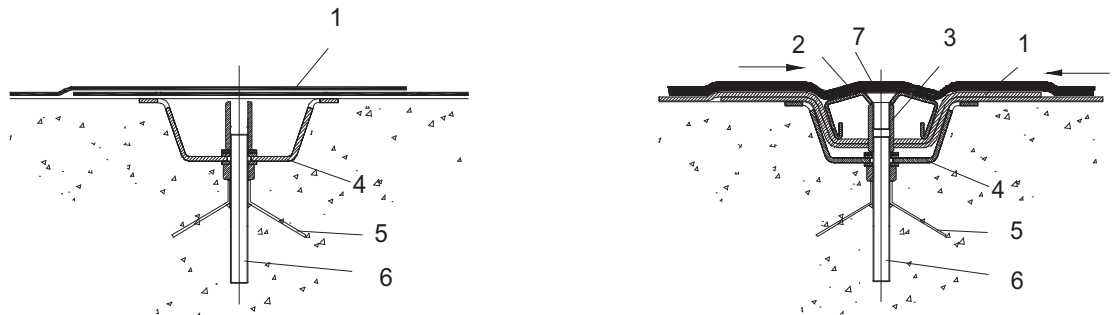


Fig. 119
Tensioning effect of the clamping system

- 1. PVC geocomposite
- 2. Tensioning stainless steel profile
- 3. Connector
- 4. Embedded galvanized steel profile
- 5. Galvanised steel anchor wings
- 6. Anchor
- 7. PVC geomembrane strip

The clamping device consists of two profiles, installed along vertical lines, and tensioning the geomembrane. The spacing ranges from 1.80 (Riou) to 3.70 m (Balambano, Olivenhain). The first profile with the coupling device is embedded in RCC, and is made of galvanized steel. The second profile, which is of stainless steel, is clamped to the embedded one after the waterproofing liner has been installed, then waterproofed by a cover strip as described for rehabilitation of concrete dams. The tensioning effect is similar to what described for rehabilitation of concrete dams in Chapter 5.

The two profiles can also be installed over the completed face, as it is done in rehabilitation of concrete dams (see Fig. 83 and 85).

6.4.7. Anchorage at top

The anchorage of the geomembrane sealing system is as described for rehabilitation of concrete dams in Chapter 5.

6.4.8. Anchorage at submerged periphery

Anchorage at all submerged peripheries has to be watertight and generally the same as that described for concrete dams.

6.5. INSTALLATION TECHNIQUES

6.5.1. Exposed geomembrane system

6.5.1.1. Concurrent installation

To be sure that the support surface is suitable for safe installation and performance of the geocomposite, it is recommended that control and acceptance of the surface prepared by the Main Contractor is made by the Engineer in conjunction with the waterproofing contractor.

The surface should be examined to verify that all offsets, protrusions, cavities, honeycombs are compatible with the proposed geomembrane (see Chapter 5, § 5.4.3) and/or repaired before installation of the sealing system. Some trimming of lift joints may be required. This evaluation includes also the embedded parts of the system (box drain conduits, vertical fastening profile, ventilation pipes), which should have been correctly installed and verified that they are not obstructed by concrete. Inserting water into the drainage system provides useful information about its functionality.

Except for the geotextile / geonet drainage layer behind the geomembrane, all parts of the drainage system are commonly embedded in the concrete of the dam body. Monitoring pipes if any are also embedded in the RCC lifts. The conduits must be secured prior to RCC placement to avoid displacement by concreting. The peripheral box drain should preferably be slightly inclined to improve discharge.

Connection of segments of collection drain and discharge conduits shall be watertight, to avoid intrusion of concrete during placement. They should also be flexible at the vertical contraction joints in the dam. All embedded metalwork is of galvanised steel.

Special consideration should be taken with the embedded conduits under the construction traffic loads.

Embedded profiles must be checked for respect of verticality and spacing tolerances. At the upper and lower ends of the vertical line, tapered profiles are recommended to avoid sharp angles.

Before installation of the geomembrane liner, additional support should be placed at the vertical contraction joints, to avoid intrusion of the geomembrane liner into the joints under the pressure of the reservoir. The support layers, which generally consist one or more supplementary layers of geomembrane, should be anchored to the RCC by impact anchors.

On very high dams, lining of the exposed geomembrane is made in horizontal sections, generally corresponding to drainage horizontal compartmentation. Installation in horizontal sections generally negates the need for transverse welding of the liner, and allows use of panels that are not too long and therefore are more easily handled by the workers on the platforms also minimizing risk related to wind during installation and relevant safety concerns for the workers. When installation of the liner is made in horizontal separate phases, the liner is generally unrolled from travelling platforms suspended by a railing system that can be assembled and dismantled at appropriate elevations. In this event, it is required to provide protection to the waterproofing area against fall of objects due to construction operations above.

Installation in steps following the construction of the dam is done from the crest or by a horizontal railing system erected at convenient heights of the dam. The railing system is bolted to specific points on the face of the dam, where devoted anchors may have been previously embedded in the RCC. The railing system supports suspended platforms for the workers and winches to lift the geomembrane materials. The system was conveniently used at Balambano dam (99 m, Indonesia) and at Miel 1 (188 m, Colombia). The concurrent placement of RCC in the highest section of the dam and the exposed geomembrane in the lower parts already completed allows early impoundment of the reservoir, shorter construction time and overall lower costs.



Fig. 120 and 121
Railing system at Miel I, Colombia 2002

Other procedures and precautions are the same as described for concrete dams in Chapter 5.

As shown in § 5.1.2, the most effective results in terms of watertightness are obtained if the GSS is connected to the foundation layer and the grouting curtain. This option is easily achievable in the new construction of an RCC dam, with a grout curtain/plinth constructed upstream. If the grouting platform is constructed before placement of the RCC, the geomembrane which shall prevent infiltration of water through the plinth is installed over the completed platform, and the RCC lifts are placed directly against the liner, with or without an antipuncturing geotextile. If excessive time elapses between lining of the platform and construction of the dam, it is good practice to cover the liner with a temporary protection such as a sacrificial geomembrane on vertical parts, and wooden protection on horizontal parts to prevent falling materials and tools from the higher construction area from damaging the geomembrane.



Fig. 122

Wooden protection over PVC liner at platform: Olivenhain, USA, 2003

If the RCC is placed before the platform is constructed, then the synthetic liner for the plinth is placed against the RCC lifts, and the concrete is cast against the liner. Again, a sacrificial geomembrane can be an additional precaution, but so far it has not been used.

6.5.1.2. *Post-installation*

The exposed geomembrane system can also be installed subsequent to construction of the dam. In this case the vertical profiles are installed over the completed RCC lifts, as it is done in rehabilitation of concrete dams. This application could have a considerable development in the future and is at present already under consideration for the rehabilitation of some leaking RCC dams. Placement of the geomembrane exposed system after the completion of the dam entails higher costs, as all metal parts shall be in stainless steel, anchors are required and their placement is more time consuming than embedding in new concrete.

6.5.2 Covered geomembrane system

The covered geomembrane system is applied only at the time of construction of new RCC dams and cannot be used in rehabilitation. In this system the geomembrane is embedded in the pre-cast concrete panels that constitute the permanent form-work for the construction of the dam. The geomembrane is secured by embedding it in the panel during pre-casting. The concrete of the precast panels covers the liner from the reservoir water.

Panels are shaped to allow interlocking without damaging the liner. Typical dimensions are 0.8 to 1.9 m (height) x 3.0 to 5 m (length), 10 to 15 cm thickness. The impervious geomembrane is mostly PVC, either in the ribbed configuration (typically a 15 mm long rib every 150 mm), or in the geocomposite configuration used for rehabilitation of concrete dams. Anchorage is made consequently by embedding the ribs or the geocomposite in the concrete of the panels. The use of geomembrane with ribs is not recommended because it allows a reduced deformation of the liner and its use as such has been discontinued by the manufacturer who first invented it. In the case of a geocomposite, first fresh concrete is placed into the casting bed, followed by rolling and vibrating the liner material onto the exposed concrete surface of the panel, with the geotextile side of the material placed on the fresh concrete. The liner remains attached to the panel through the bond made by absorption of concrete paste into the geotextile material. This method of attaching the PVC liner to the precast panels was initially tested for the Penn Forest Dam project (USA, 1997) by pulling apart several panels partially connected by PVC joint strips welded to the liner material on each adjacent panel. The destructive testing demonstrated that the stress concentrations in the PVC liner material did not concentrate at the welds between panels, but became distributed within the liner over much of the panel area. It was observed that as the panels were pulled apart, the bond between the geotextile and the PVC liner failed first, allowing the liner material to behave elastically and stretch more than 50 cm at the joints before failing. This method of attachment offers several benefits over the traditional T ribbed surface anchor system for liner attachment, including: greater flexibility, improved liner elongation, and better resistance to stress concentrations. After Penn Forest, the method has been adopted at Buckhorn, Hunting Run, North Fork Hughes River, Blalock (USA), and Burnett River (Australia).



Fig. 123
Destructive testing of Penn Forest panel

The support surface can be the RCC of the lifts, or bedding mix, or concrete mix (high or low cement content). The support surface, and construction operations, mainly compaction, are the main agents of possible damage to the sealing layer.

The perimeter seal at the bottom and at the abutments is generally made by embedding a geomembrane strip in the starter block of the dam and watertight welding it to the bottom row or first side row of the concrete panels.

Installation starts by placing the first row of panels over the starter block and by welding onto the panels the geomembrane strip from the starter block. To obtain a watertight continuous geomembrane sealing, all joints between panels are waterproofed by PVC cover strips watertight welded over the PVC lining the panels. Construction continues by placing superimposed rows of panels following placement of the RCC. The welded length is several kilometres for each dam.

The panels are connected with the dam by watertight anchor bars tying into the concrete of the dam.

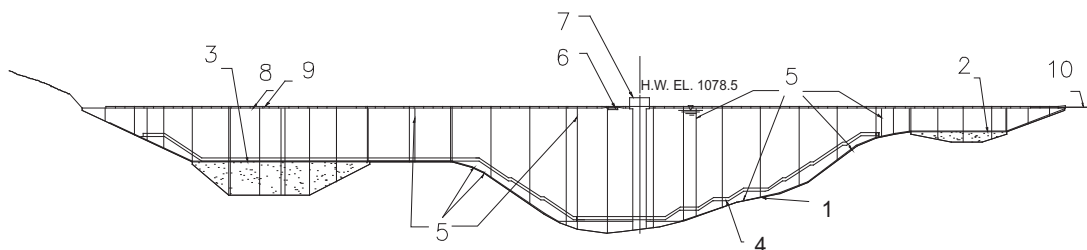
The covered system, which is patented, has been adopted mostly in USA. Applications have been made also in Argentina, Angola, and Turkey.

In the covered system, as inspection and repair of the liner is not feasible after construction of the dam, the geomembrane side of the liner that can be damaged during construction must be protected against such damage. The protection is given by a stringent quality control, and by making all construction teams fully aware that proper construction procedures are crucial for good performance of the liner. Quality Control of the integrity of the geomembrane and of the welds is essential as no further quality control inspections can be done after placing of the concrete against the panels.

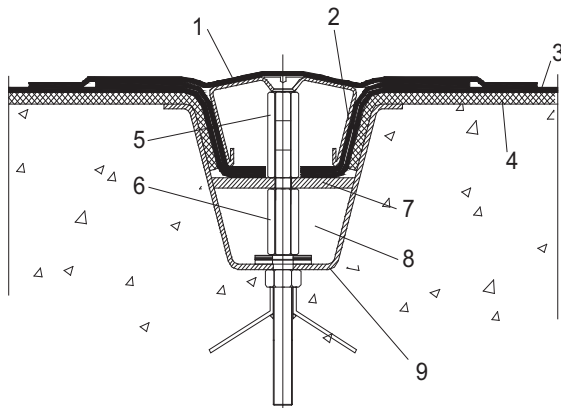
6.6. TYPICAL EXAMPLES

6.6.1. Exposed PVC geomembrane, installed after completion of dam, geonet on entire upstream face

Appendix 1: Olivenhain Dam, USA 2003



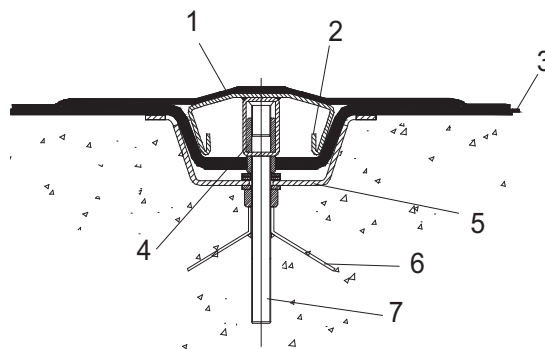
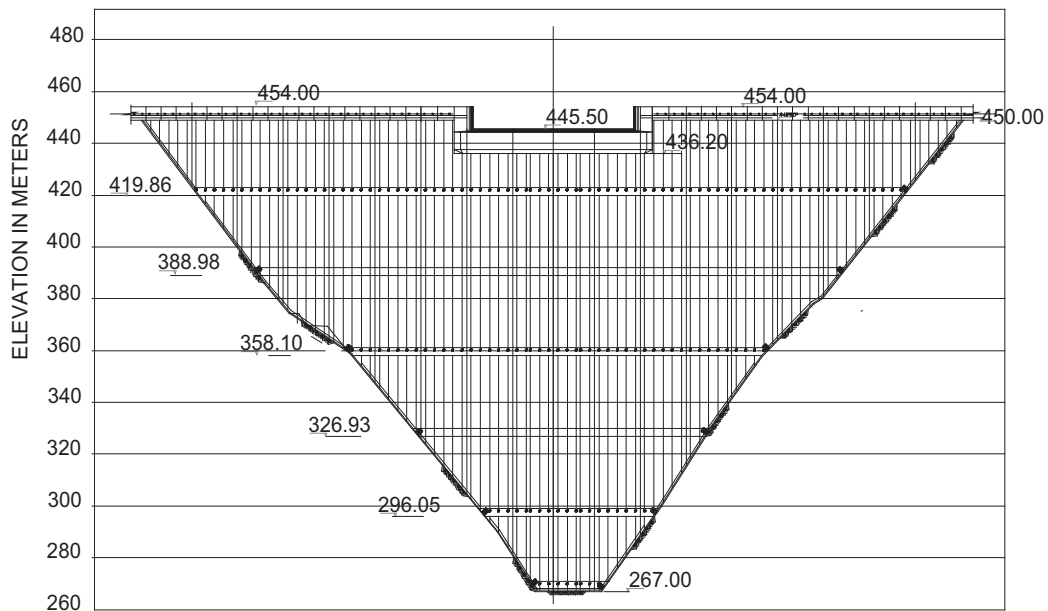
- | | |
|--|--|
| 1. Top of foundation rock | 5. Compartment perimeter |
| 2. Top of right abutment foundation shaping block El. 1025.0 | 6. Spillway |
| 3. Top of left abutment foundation shaping block El. 950.0 | 7. I/O tower |
| 4. Gallery | 8. Top of dam El. 1083.5 |
| | 9. Top of parapet El. 1087.0 |
| | 10. Existing permanent dam access road C/L |



1. PVC cover strip (2.5 mm PVC geomembrane)
2. Tensioning stainless steel profile (patented)
3. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
4. Geonet
5. Upper connector
6. Lower connector
7. Support plate
8. Drainage channel
9. Embedded galvanised steel profile

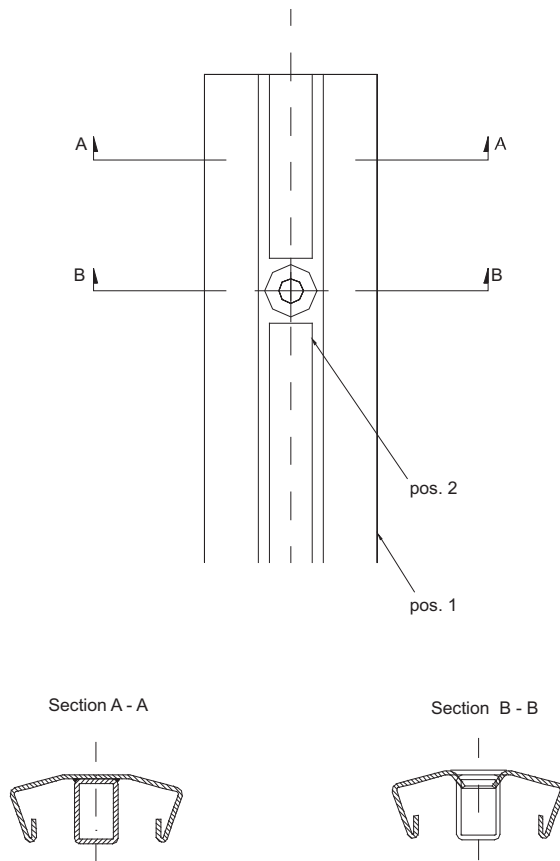
6.6.2. Exposed PVC geomembrane with different thickness depending on water head, installed during construction of dam

Appendix 1: Miel I Dam, Colombia 2002



1. PVC cover strip (thickness 2.5 / 3 mm depending on depth)
2. Tensioning stainless steel profile (patented)
3. PVC geocomposite (PVC geomembrane thickness 2.5 / 3 mm depending on depth)
4. Connector
5. Embedded galvanised steel profile
6. Galvanised steel anchor wings
7. Anchor

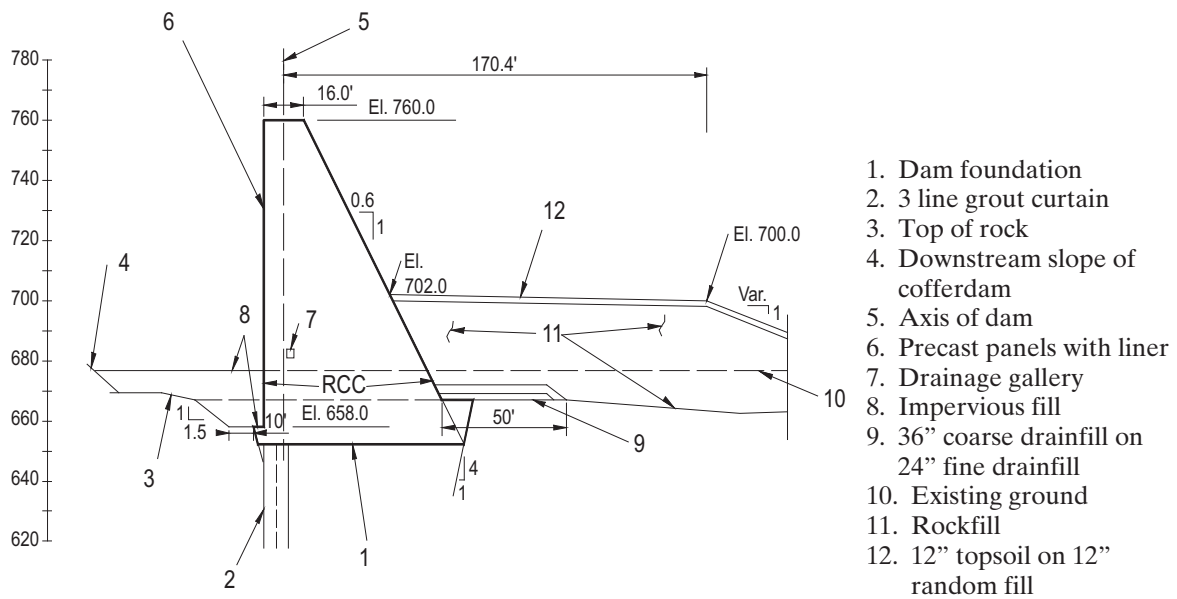
REINFORCED PROFILE



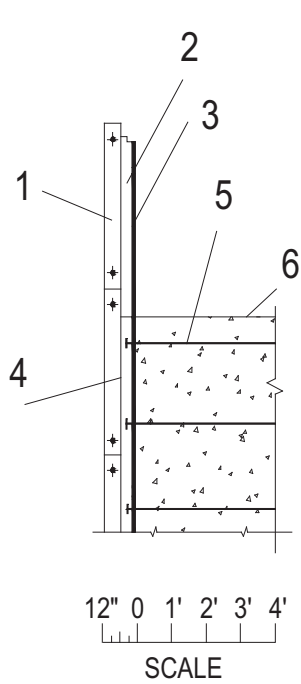
6.6.3. Covered PVC geomembrane, part of prefabricated panels used as permanent formworks for construction of dam

Appendix 1: North Fork Hughes River Dam, USA 2001

TYPICAL SECTION

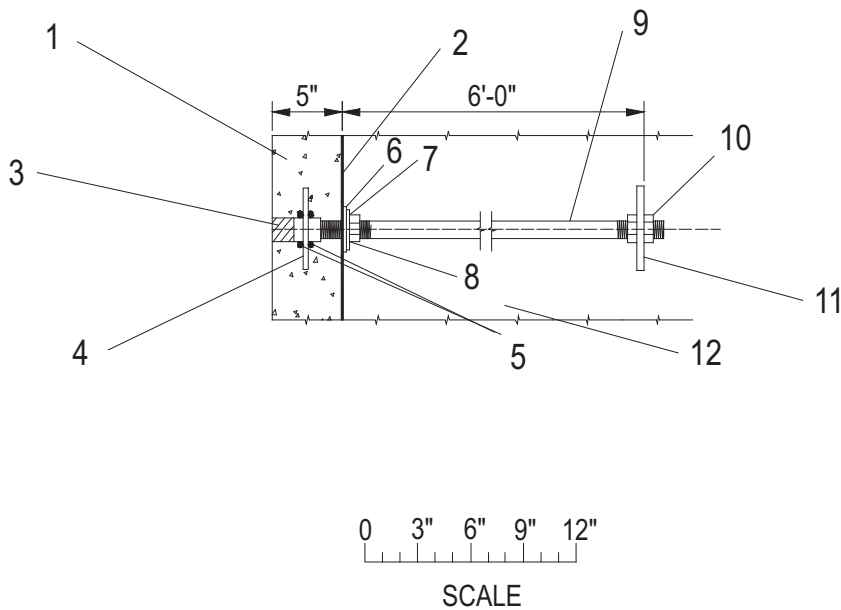


ERECTION DETAIL



1. Temporary strong steel back pillars fastened to panels w/bolts threaded into panel inserts
2. Precast panels with embedded PVC liner (3)
3. PVC liner
4. Upstream face of dam
5. Anchor rods (4 per panel)
6. RCC lift surface

ANCHOR ROD DETAIL



- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Precast concrete panel 2. Insert holes patched w/non shrink mortar after panel installation 3. PVC waterproofing geocomposite (2 mm PVC geomembrane + 200 g/m² geotextile) 4. 3/8" x 4" x 4" galvanised steel plate 5. 1/4" fillet weld, each side 6. Rubber gasket | <ol style="list-style-type: none"> 7. Stainless steel flat washer 8. Stainless steel nut 9. 3/4" coll rod of threaded bar (galvanised) 10. Stainless steel nut each side 11. 3/8" thick x 6" square galvanised steel plate w/13/18" drill hole 12. RCC |
|--|--|

7. SPECIAL CASES

Special cases are those in which the geomembrane system has been used for repair of limited areas or in which the application has been performed in conditions very different from normal cases.

Special cases include waterproofing of joints on concrete faces (concrete dams, CFRD, RCC dams), both for new construction and rehabilitation, and underwater installation.

7.1. GENERAL

From the database, special cases are as follows.

Table 34
Special cases

	New construction	Repair	Total
Concrete	2	3	5
RCC	3	3*	5
CFRD	0	1	1
Other fill dams	2	3	5
Total	7	9	16

* One installation made on same dam where geomembrane had already been installed on joints (new construction).

In the repair of concrete and RCC dams, geomembrane systems have been installed both in the dry and underwater. Applications include repair of failing joints, installation of the geomembrane as an elastic waterstop at the bottom perimeter joint, and the repair of cracks. In all known applications the geomembrane has generally been left exposed.

In new construction, the same system has been adopted as an external waterstop for vertical contraction joints in RCC dams, and as pre-formed elastic joints at the foundation in arch dams.

7.2. SYSTEM AS REPAIR OF JOINTS AND CRACKS

7.2.1. General

Partial sealing systems are normally used to seal specific joints such as the perimeter joint of concrete dams (Kölnbrein, Austria) or horizontal joints in CFRD where potential cracking is expected (Karahnjúkar, Iceland) or joints with failed joint sealant (Vale do Rossim, Portugal) or cracks in the concrete or the construction joints of RCC dams (Dona Francisca, Brazil). The design and construction of partial sealing systems are site specific. In most cases, the system

comprises a geomembrane strip of sufficient width for overlapping the joint or crack. The strip is fastened to the concrete face of the dam by simple compression clamping devices, i.e. the geomembrane is clamped between the concrete face and a flat stainless steel profile, with gasket layers for compression distribution. To allow more efficient compression distribution, in the case of a rough surface of the concrete face, the surface is smoothed by an epoxy resin coating or by grinding. The steel profile is anchored to the concrete face by stainless steel anchors, either of chemical or mechanical type. Some of the more frequently used sizes of the steel profile and of the anchor are as indicated in Chapter 5.

The system adopted is typically the same geomembrane system described for complete rehabilitation, in general an additional supporting layer should be provided beneath the geomembrane to avoid its intrusion into the open crack or joint under water pressure. The extent of lining is such as to cover the joint/crack extended at both sides to a width of at least 0.5 m along the entire joint/crack. In the event of feathered or branched cracks, the geomembrane should be extended to cover the entire affected area.

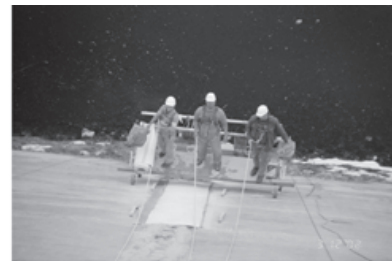


Fig. 124 and 125

Repair of failing joints of a CFRD with a PVC exposed geomembrane: Main Strawberry, USA 2002

Design and installation aspects are substantially similar to what described for the rehabilitation of an entire upstream face.

7.2.2. Support

The geomembrane must be supported to avoid intrusion into the joint/crack under the water pressure. Intrusion could create excessive stress resulting in bursting of the geomembrane. Typical flexible support layers consist of one or more additional layers of geomembrane / geocomposite, depending on the water head. Geotextiles may be considered for support but only for very low water heads. In the presence of high water heads, and wide openings, rigid supports can be effective. Testing should be adopted to confirm the design prior to installation.

7.2.3. Anchorage

The need for anchorage of the sheets depends on the extent of the covered area. As the geomembrane follows the path of the crack for a total width that is generally not wider than 1 m, peripheral anchorage may be sufficient to anchor the geomembrane over the facing. Should the presence of more than one crack call for a much greater width of the geomembrane, then additional intermediate anchorage lines may be appropriate.

Generally the anchorage is provided by a simple clamping device with the same compression type seal described for total rehabilitation, i.e. the geomembrane is clamped between the dam surface and the steel profiles with rubber gasket layers on both sides for distribution of forces. The clamping profile is anchored to the dam face through the geomembrane by means of chemical or mechanical anchors.

7.2.4. Sealing at periphery

The geomembrane is sealed along the entire perimeter with a clamping device. Peripheral sealing should not be used on areas where the concrete is not sound, or in presence of cracks, unless treatment is done.

In places where the peripheral seal could be bypassed by water (e.g. at the bottom of a joint, or where the seal intercepts another joint or crack), it is strongly recommended that adequate measures are taken to prevent leakage. At bottom and top, this can be accomplished by connecting the lined area with a sump filled with impervious materials such as epoxy or a grouting material. Over the facing, grouting through holes drilled to intercept the infiltration paths have proven effective. This is a crucial zone for good behaviour of the system.

It is essential that the geomembrane be sealed all along the boundaries, including the bottom and top.



Fig. 126 and 127

With no bottom seal, the water by passes the geomembrane, which is also torn (EPDM geomembrane at Scott's Peak, Australia)

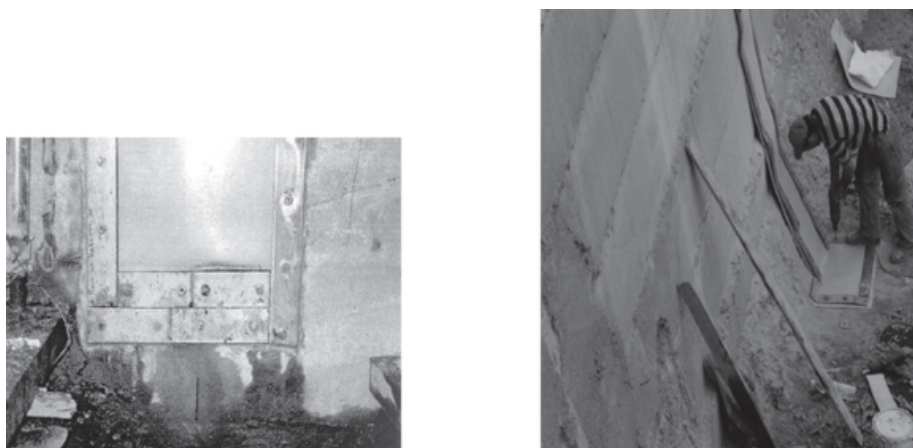


Fig. 128 and 129

With effective bottom seal, water cannot bypass the geomembrane (PVC geomembranes at Vale do Rossim, Portugal, and Platanovryssi, Greece)

7.2.5. Cover layer

Generally speaking, a cover is not necessary unless the crack extends to an area that could be exposed and there is a serious concern for mechanical damage by vandalism or other causes. As an additional precaution against such events, cover can be provided in the vulnerable horizontal zones, or in the zone of reservoir fluctuation, and can consist of a steel plate or a layer of concrete or shotcrete.

7.3. SYSTEM ON INDUCED CONTRACTION JOINTS (RCC DAMS)

7.3.1. General

Conventional design of the waterproofing system for the vertical contraction joints of RCC dams is based on the concept of providing multiple lines of defence against water infiltration, placed in internal position, by means of embedded waterstops. Usually a line of vertical drains is created behind the waterstop to intercept potential leakage. The assumption is that embedded waterstops are made with materials that theoretically are deformable enough to accommodate and resist movement of the joints, and that in the event that one waterstop fails, there will still be another waterstop to resist the load. The movement can be in three dimensions due to closing/opening of the joint, hydrostatic head, shear (in case of settlement). More frequently the load is a combination of the three.

This approach can be disputed on the basis that conventional embedded waterstops allow deformation only in the central portion of the bulb, and field experience has shown that they are not always efficient in accommodating movements at the joints during service. The waterstop is embedded into the adjoining monolith blocks and the maximum deformation it can face is a function of the free space between the blocks. In the case of a PVC waterstop, the theoretical approach suggests that the maximum elongation that it can absorb is approximately 250 % of the free space. Experience shows that the deformation can amply exceed this value. The stresses imposed on the waterstops can therefore be excessive. As a consequence, there is no certainty that the line of defence provided by embedded waterstops, even if multiple, is not susceptible to failure. Furthermore their installation is quite complicated in a highly mechanised operation such as placement and compaction of RCC and various mixes on the upstream face of the dam.

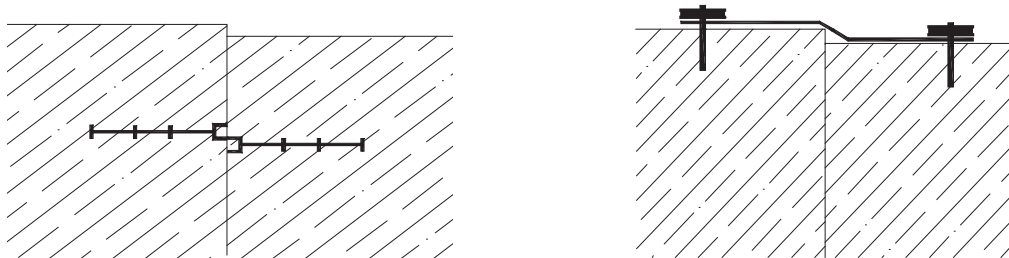


Fig. 130 and 131

Concept of elongation in embedded and external waterstops.

If the shear stresses exceed the elongation capability of the bulb, the embedded waterstop fails

The external waterstop system is a development of the concept adopted for waterproofing the entire dam. In the exposed geomembrane system, the upstream

face of the dam is lined by an impervious elastic geomembrane, fastened along the perimeter by a watertight mechanical seal. On joints and cracks, the geomembrane is installed over the joint/crack in an exposed position, as an external waterstop. For the external waterstop, the waterproofing geomembrane has a typical width of 40 to 50 cm, and is anchored so that it can elongate over its entire width to follow the movements of the joint. The PVC geocomposite, for example, has an elongation at break exceeding 230% and the attached geotextile an elongation at break around 50%. As a result, a 20 to 25 cm joint opening is required for the geotextile to break. If the joint opening is less than 20 to 25 cm, the geomembrane will still maintain its imperviousness and elasticity, and a 90 to 115 cm joint opening is required for the geomembrane to break. These figures of the elongation that the external waterstop can attain have an order of magnitude (a hundred centimetres), which is evidently substantially greater than any realistically anticipated movement of joints. On the other hand, the deformation that a traditional embedded waterstop can sustain is based essentially on the dimensions of the central bulb; therefore the elongations that it can attain are by at least one order of magnitude less than those of a geomembrane external waterstop. Hence the field evidence of failure of traditional embedded waterstops and of the good performance of external waterstops.

The advantage of an external waterstop in comparison with an embedded waterstop can be summarised as follows:

Table 35
Comparison of embedded and external waterstops in RCC dams

Conventional embedded Waterstop	External Waterstop
Elongation is function of free space between blocks (can accommodate mm)	Elongation is free over entire width of waterstop (can accommodate cm)
Placement interferes with construction of dam	Placement does not interfere with construction of dam
Needs internal drains	Has its own face drainage system
Does not protect from water infiltration at heel	It is extended to protect from water infiltration at heel

The multilayered geomembrane system, now patented, has been used in new construction (waterproofing of induced contraction joints, as external waterstop) as well as in rehabilitation (waterproofing of defective joints, and of unforeseen cracks in the upstream face, see paragraphs above). Underwater installation has also been made, for repair of cracks in RCC dam (Platanovryssi).

In case of new construction, the liner covers the induced joint in form of a strip, centred on the joint and typically 40 to 50 cm wide. In case of cracks, the liner follows the path of the crack, its width and anchorage depending on the width of the crack and of its feathering, as described for repair of concrete dams.

7.3.2. Design

The external waterstop provides one or more line of defence in external position over the upstream face of the dam. The configuration is conceptually as follows:

A support layer is placed over the finishing of the upstream face in the area of possible opening of a joint or crack. The support layer is arranged so as to follow the opening/closing of the joint. The function of this component is to provide enough support to the waterproofing system in case of maximum opening of the joint and maximum water head. The support should be flexible to allow movement over the joint.

The waterproofing geomembrane sealing strip is placed over the support and anchored independently from it at its periphery. This component is typically a composite geomembrane (geocomposite). The waterproofing geocomposite is placed to cover the support, for an area exceeding 20 to 25 cm the area of possible opening of the joints on each side, and is anchored along the perimeter by a watertight seal of the clamping type already described for rehabilitation of concrete dams.

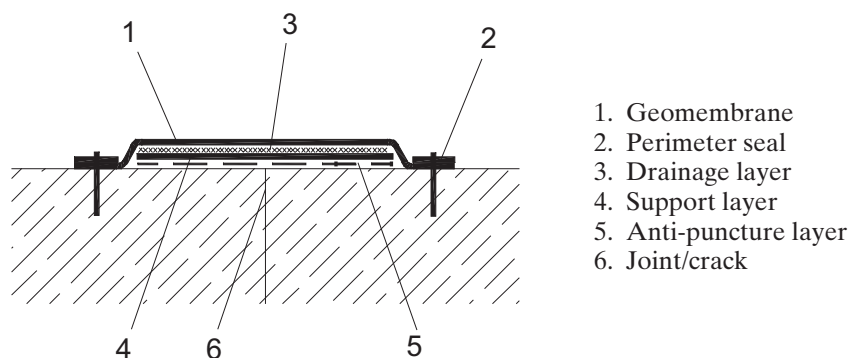


Fig. 132
Scheme of external waterstop

In the event that it is required to cover the waterproofing geomembrane, for instance if there is serious concern about wilful damage, then an optional independent protection can be installed in the area of concern. The protection system is conceived so as to be able to accommodate the opening/closing of the joint. This protection cover is considered optional, as it in no way contributes to the efficiency of the waterproofing system. The protection may consist of a steel cover plate that is anchored on the dam surface outside the sealing strip.

At the heel or periphery of the dam, the face waterstop geomembrane must be connected to a system that prevents water by-passing the perimeter seal and which prevents infiltration of water.

It is strongly recommended that for the final design the anticipated sealing configuration for the exposed waterstop systems is verified using a series of testing cycles with large scale simulation testing in pressure vessels, under loads of maximum water head applied at the maximum anticipated opening of the joint with an appropriate safety coefficient. Characteristics to test are:

- The efficiency of the watertight perimeter seal of the system under the applied water head (the system shall be watertight)
- The efficiency of the waterproofing system and of its support across of the joint (the system shall not fail at full hydrostatic head and at full opening).

7.3.3. Subgrade preparation

Preparation of the subgrade is as specified in earlier paragraphs on waterproofing of the entire RCC dam. Support against intrusion of the geomembrane waterstop into the joint/crack is a function of the anticipated opening of the joint/crack and of the water head.

Generally in very high dams a rigid support is installed over the joint. At Platanovyssi dam (95 m, Greece) the support comprises additional layers of geotextile and geocomposite installed over the concrete filling the notch.



Fig. 133 and 134

Layering of external waterstop at Platanovyssi, Greece (left) and Porce II, Colombia (right)

At Porce II dam (118 m, Colombia) the rigid support was made with two superimposed stainless steel plates. A strip of Teflon was placed in the area of overlapping of the steel plates, to decrease friction. Over the steel rigid support, a flexible support provides additional protection to the waterproofing liner against intrusion and possible damage from the subgrade, and low friction so that the liner can elongate over the active joint in total independence from the support. The flexible support is made by sacrificial PVC geocomposites and/or thick geotextiles, which provide additional drainage capability.

The various support layers must in all cases be anchored so that they can freely and independently follow the movements of the joint without affecting each other as this interference could decrease the ability of the system to follow movements and maintain watertightness.

7.4. TYPE OF GEOMEMBRANE

Criteria for selection of the geomembrane are similar to those listed in Chapter 5 and 6 and are mainly based on whether the geomembrane will be left exposed or covered.

The most important requirements that the geomembrane shall satisfy are

- Durability
- Elasticity (to accommodate movements and openings)
- Burst resistance (to bridge opening, but a robust bridging material below the geomembrane can reduce the requirement)
- Flexibility (to accommodate the subgrade at the position of the watertight perimeter seal)

- Mass (mass of the geomembrane > 1 g/cm³ avoids buoyancy in underwater installation, increasing the factor of safety during operation and simplifying construction).

From the data base:

Table 36
Types of geomembranes in special applications

	PVC	CSPE	LLDPE	In situ GM	TOTAL
New construction, exposed GSS	3	0	0	0	3
Rehabilitation, exposed GSS	6*	1	0	1	7
New construction covered GSS	1	1	1	0	3
Rehabilitation, covered GSS	0	1	1	0	2
Unknown	1	0	0	0	1
TOTAL	10	3	2	1	16

* One installation made on same dam where geomembrane had already been installed on joints (new construction).

7.5. UNDERWATER APPLICATIONS

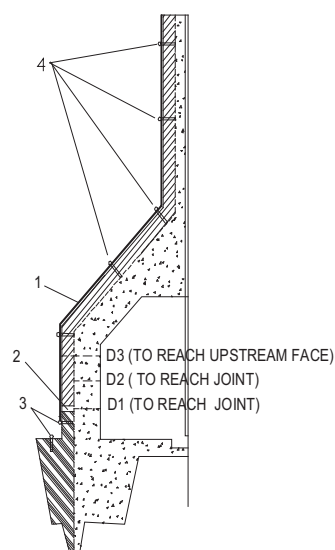
The various matters described in Chapter 5 for underwater installation also apply to joints and cracks. The system for waterproofing of cracks has been installed underwater on Platanovryssi dam. Due to the generally limited area of geomembrane that is installed, construction of a frame that is used as a template can facilitate correct underwater placement of the geomembrane.

7.6. TYPICAL EXAMPLES

7.6.1. Exposed PVC geomembrane for repair of failing joints/cracks

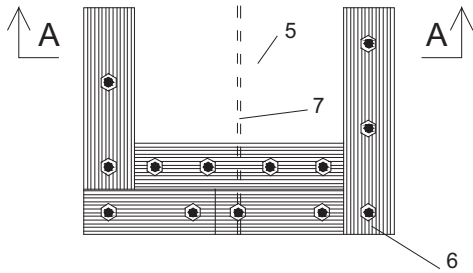
Appendix 1: Vale do Rossim Dam (Portugal)

CONCEPTUAL CROSS SECTION

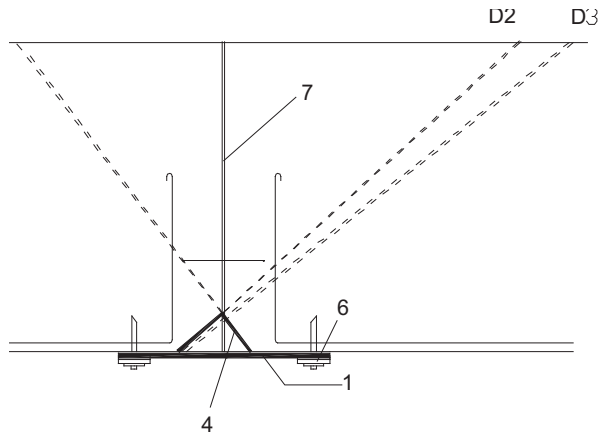


1. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
2. Hole
3. Grouting pipes
4. Grouting pipes at 1.50 m spacing from upstream to waterstop

VIEW OF ELEVATION AT HEEL



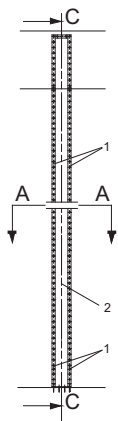
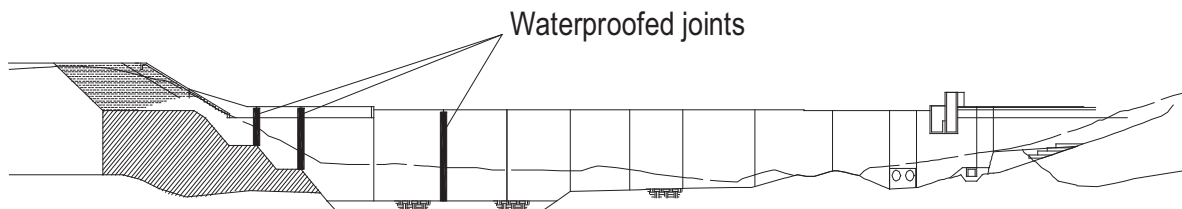
- 5. Concrete
- 6. Watertight perimeter seal
- 7. Joint



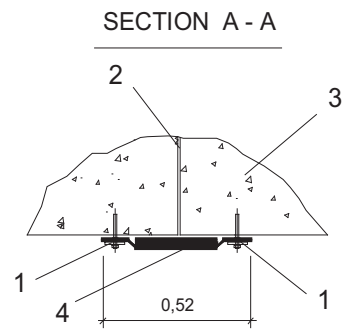
- 1. PVC geocomposite
- 4. Grouting pipes at 1.50 m spacing from upstream to waterstop
- 6. Watertight perimeter seal
- 7. Joint

7.6.2. Exposed PVC geomembrane on contraction joints where major movements are expected

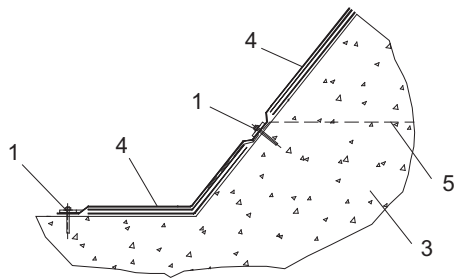
Appendix 1: Eidsvold Main Weir Dam (Australia)



- 1. Perimeter seal
- 2. Joint
- 3. Concrete
- 4. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)



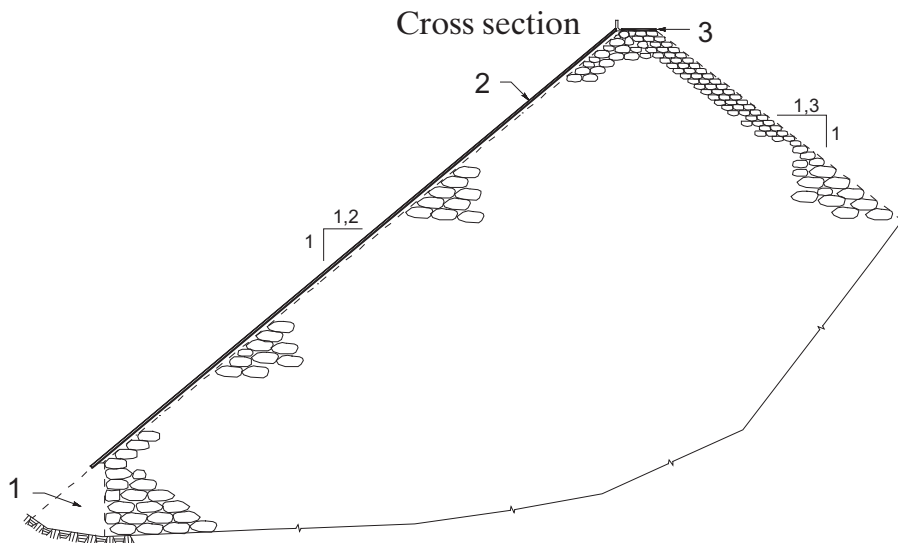
SECTION C - C



- 1. Perimeter seal
- 5. Waterstop
- 3. Concrete
- 4. PVC geocomposite

7.6.3. Exposed PVC geomembrane on leaking joints

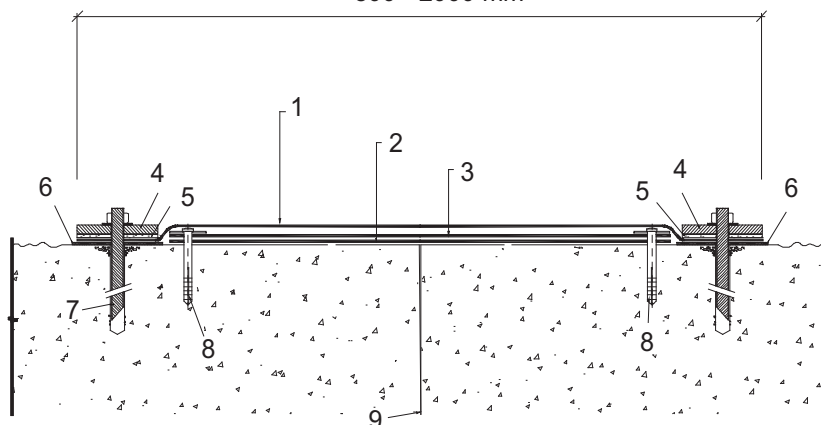
Appendix 1: Main Strawberry CFRD (USA)



- 1. Existing concrete toe wall
- 2. 6" concrete refacing on upstream slope
- 3. 4" concrete working slab along crest of dam

Cross section of repair

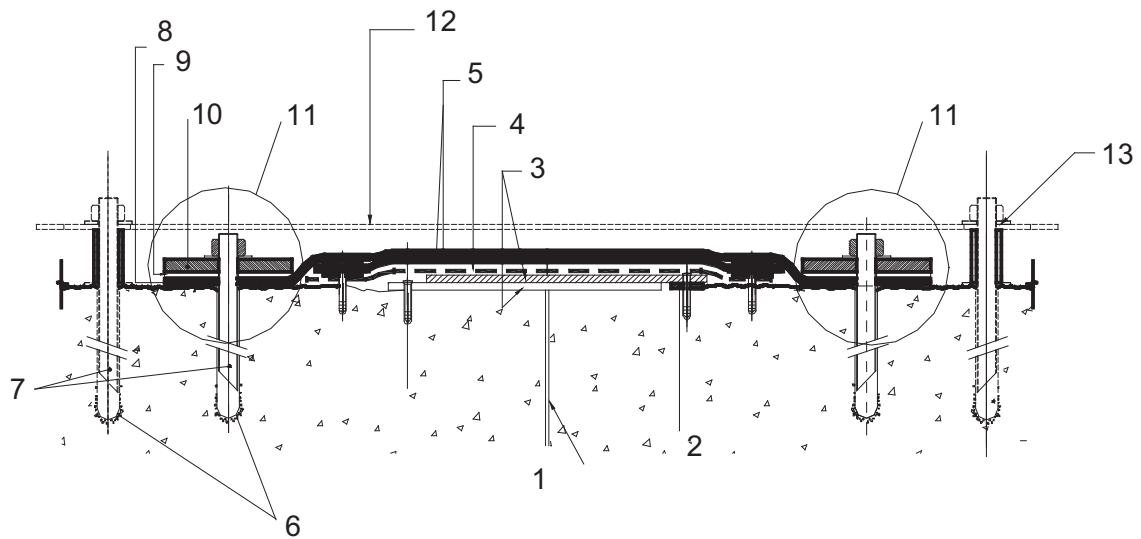
800 - 2000 mm



- 1. PVC geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m² geotextile)
- 2. 1st support layer
- 3. 2nd support layer
- 4. Stainless steel profile
- 5. Gasket
- 6. Regularisation layer
- 7. Chemical anchor
- 8. Impact anchor
- 9. Leaking joint

7.6.4. Exposed PVC geomembrane on contraction joints since construction

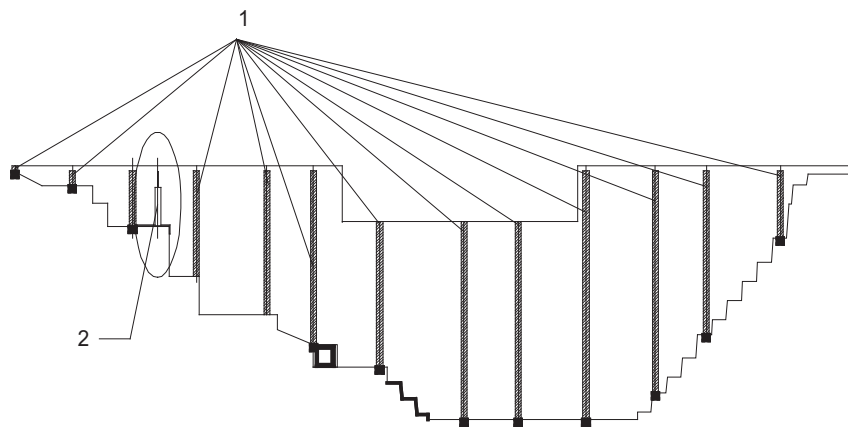
Appendix 1: Porce II RCC Dam (Colombia)



- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Contraction joint (maximum opening 25 mm) | 7. Stainless steel threaded rod |
| 2. Stainless steel spacer | 8. Bedding mortar (epoxy resin) |
| 3. Stainless steel sliding support | 9. Rubber gasket |
| 4. Geotextile | 10. Stainless steel profile |
| 5. PVC waterproofing geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m ² geotextile, 2 layers) | 11. Watertight seal |
| 6. Chemical anchor | 12. Stainless steel protection plate |
| | 13. Groove |

7.6.5. Dry and underwater installation: exposed PVC geomembrane on joints and crack

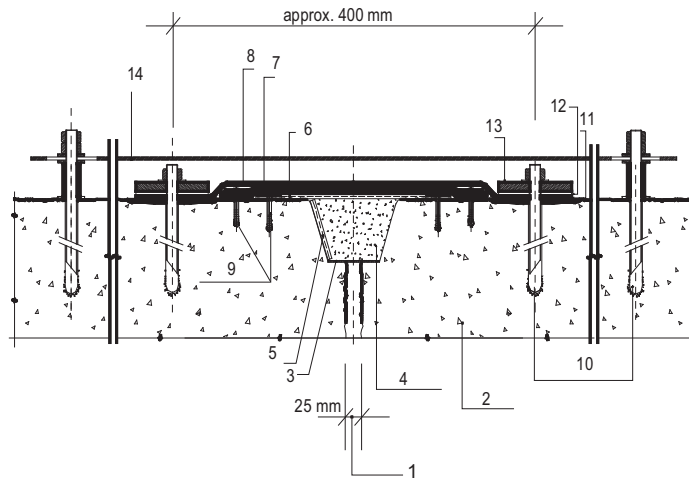
Appendix 1: Platanovryssi RCC Dam (Greece)



1. Watertight joints

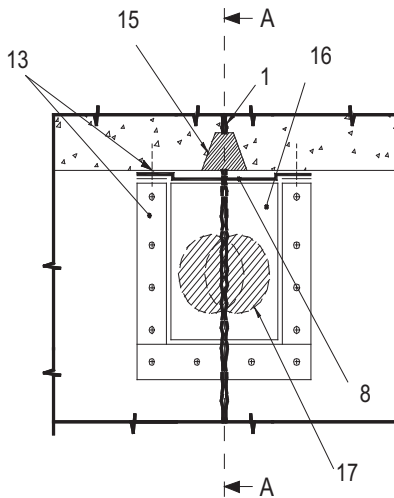
2. Crack – Detail A

CROSS SECTION OF EXTERNAL WATERSTOP ON CONTRACTION JOINTS



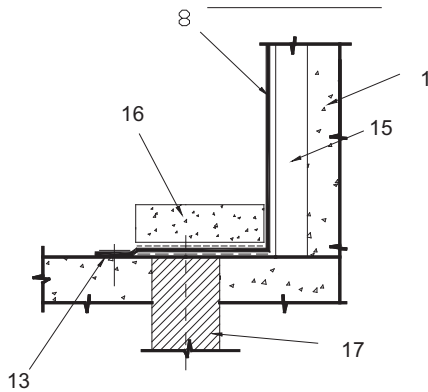
- | | |
|---|--|
| 1. Maximum joint opening | 9. Impact anchors |
| 2. Dam RCC concrete | 10. Chemical anchors |
| 3. Steel plate | 11. Bedding mortar |
| 4. Concrete filling | 12. Rubber gasket |
| 5. Geotextile | 13. Watertight perimeter seal -Flat Stainless steel profiles |
| 6. Transition and anti-puncturing geotextile | 14. Steel plate protection (for fluctuation zone only) |
| 7. PVC geocomposite for support (2 layers) | |
| 8. Waterproofing PVC geocomposite (2.5 mm PVC mm PVC geomembrane + 500 g/m ² geotextile) | |

HORIZONTAL CROSS SECTION

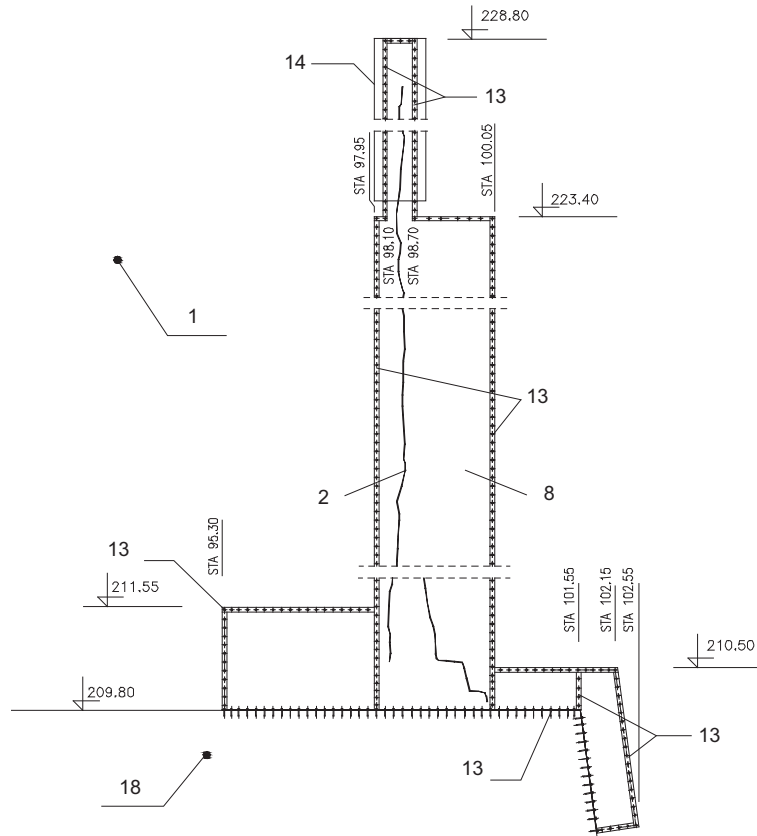


- | |
|--|
| 1. Contraction joint |
| 15. Notch |
| 8. PVC Geocomposite (2.5 mm PVC geomembrane + 500 g/m ² geotextile) |
| 13. Watertight perimeter seal |
| 16. Concrete ballast |
| 17. Grouting |

SECTION A - A



- | |
|-------------------------------|
| 1. Contraction joint |
| 15. Notch |
| 8. PVC Geocomposite |
| 13. Watertight perimeter seal |
| 16. Concrete ballast |
| 17. Grouting |



DETAIL A - FRONT VIEW OF UPSTREAM FACE WITH CRACK

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. RCC Dam face | 13. Watertight perimeter seal |
| 2. Crack | 14. Steel plate protection (for fluctuation zone only) |
| 8. PVC waterproofing geocomposite | 18. Concrete plinth |

8. CONTROL OF QUALITY OF A GEOMEMBRANE SEALING SYSTEM

8.1. FOREWORD

The two steps of design and construction are closely related and the installation problems will be more easily addressed if they have been considered in the design stage of the Geomembrane Sealing System and of the structure: functional analysis, selection of the geomembrane, calculation of the other elements of the GSS, inclination of slopes, etc.

The search for quality in waterproofing works related to dams is indispensable. This is because of the safety of the structure, of the capital invested, of the cost of repair of the geomembrane, especially if it has a cover layer. The quality in the construction of the GSS assures, in terms of watertightness, the required functioning and the expected durability over the time. An important success factor is the good workmanship and accuracy in placement and welding. This can be obtained through qualification and experience of welders and installers. Certifications on products and welders are issued in several countries.

Coordination of subgrade preparation and the cover layer shall be addressed in specific points to be carefully selected and introduced in a quality assurance general plan.

8.2. QUALITY CONTROL AND QUALITY ASSURANCE

Sealing systems with geomembranes can be controlled to assure that they are watertight. The control of quality of the sealing system after installation and before filling of the reservoir is composed of two stages:

- At manufacturing (M)
- At construction (C)

and comes under the dual headings of quality control (QC) and quality assurance (QA).

It is important to define and understand the differences between MQC and MQA and between CQC and CQA and to counterpoint where the different activities contrast and/or complement one another. These four definitions follow:

- **Manufacturing Quality Control (MQC):** a planned system of inspections that is used to directly monitor and control the manufacture of a material which is factory originated. MQC is normally performed by the manufacturer of geosynthetic materials and is necessary to ensure minimum, or maximum, specified values in the manufactured product. MQC refers to measures taken by the manufacturer to determine compliance with the requirements for materials and workmanship as stated in certification documents and contract plans and specifications.
- **Manufacturing Quality Assurance (MQA):** a planned system of activities that provide assurance that the materials were manufactured as specified in the

certification documents and contract plans and specifications. MQA includes manufacturing facility inspections, verifications, audits and evaluation of the raw materials and geosynthetic products to assess the quality of the manufactured materials. MQA refers to measures taken by the MQA organization to determine if the manufacturer or fabricator is in compliance with the product certification and contract plans and specifications for the project.

- **Construction Quality Control (CQC):** a planned system of inspections that are used to directly monitor and control the quality of a construction project. Construction quality control is normally performed by the geosynthetics installer to achieve the highest quality in the constructed or installed system. Construction quality control (CQC) refers to measures taken by the installer or contractor to determine compliance with the requirements for materials and workmanship as stated in the plans and specifications for the project.
- **Construction Quality Assurance (CQA):** A planned system of activities that provide assurance that the facility was constructed as specified in the design. Construction quality assurance includes inspections, verifications, audits, and evaluations of materials and workmanship necessary to determine and document the quality of the constructed facility. Construction quality assurance (CQA) refers to measures taken by the CQA organization to assess if the installer or contractor is in compliance with the plans and specifications for the project.

MQA and CQA are performed independently from MQC and CQC. Although MQA/CQA and MQC/CQC are separate activities, they have similar objectives and, in a smoothly running construction project, the processes will complement one another. Conversely, an effective MQA/CQA program can lead to identification of deficiencies in the MQC/CQC process, but a MQA/CQA program by itself (in complete absence of a MQC/CQC program) is unlikely to lead to acceptable quality management. Quality is best ensured with effective MQC/CQC and MQA/CQA programs and it applies both to geosynthetic and natural soil materials since both require similar concern and care.

The proper and intended functioning of a geomembrane or other geosynthetic system in an engineered facility is strongly dependent on the MQC/MQA of its manufacture and the CQC/CQA of its installation. Geosynthetics are relatively new engineered materials in comparison to steel, concrete, timber, etc., and every detail must be considered in order to avert failures. Such failures are simply unacceptable if they occur anytime up to the intended design life of the facility. Proper consideration of MQC/MQA and CQC/CQA will serve well to position geomembranes (and all types of geosynthetics) as bona-fide engineering materials for the future.

The quality of the waterproofing system can be controlled for its entire service life. During first filling, drain discharge must be continuously monitored, and records subjected to interpretation as the reservoir level rises. Control of drain discharge must continue during the operational life of the structure, so that any deviation from the normal drain discharge will signal the possibility of abnormal functioning of the system. Visual inspection, and leak detection systems, can spot the damage if any.

8.3. MQC ITEMS

This part of quality control includes

- QC of materials during manufacturing and packaging
- Pre-fabrication of geomembrane panels if applicable.

Mostly, geomembranes today are manufactured according to standardised and certified procedures e.g. ISO 9000. These procedures guarantee that the product has constant quality, and that it has been controlled and verified during the entire production. Labelling and packaging procedures permit total identification and traceability of each geomembrane roll as described in Chapter 2.

The manufacturer certifies the properties of the supplied geomembrane, and provides all other certifications required by specifications. It has become common practice that specifications require that the properties of the supplied geomembrane are tested and certified also by an independent laboratory. The number of certificates is site specific as cost and time of testing can be significant. At least one complete certification for each supplied lot of geomembrane is required.

Other components of the sealing system, such as metal items, resins, geosynthetic materials etc., generally are packaged in bundles and marked according to the manufacturer's internal procedures. No additional testing is generally required for these items.

As occasionally rolls of geomembrane are pre-fabricated into larger rolls, pre-fabrication by a fabricator or by the waterproofing contractor must be executed in a dedicated pre-fabrication yard by personnel having the same qualification of those employed on site. Each prefabricated panel must be labelled to allow identification at site and shall allow traceability of the rolls which have been assembled.

8.4. PROCEDURES TO ASSURE SURVIVAL

For any geomembrane sealing system to function properly, it is necessary that the geomembrane survive the packaging, transportation, handling, and installation demands that are placed on it. This aspect of design cannot be taken lightly or assumed simply to take care of itself. Some of the major variables affecting a given situation are the following:

- Storage at the manufacturing facility
- Handling at the manufacturing facility
- Transportation from the factory to the construction site
- Offloading at the site
- Storage conditions at the site
- Temperature extremes at the site
- Subgrade conditions at the site
- Deployment at the approximate location
- Movement into the final seaming location
- Treatment at the site during seaming
- Exposure at the site after seaming
- Placement of the cover material or soil backfill on the completed geomembrane where applicable.

With a well-planned construction quality assurance (CQA) document, competent full-time inspection by CQA personnel, and cooperation of the installation contractor, the geomembrane can survive to the point of beginning to function as designed.

While being stored, transported, handled, and installed, geomembranes are most often vulnerable to tear, puncture, and impact. Such events often come about accidentally, by vandalism, or by poor workmanship. Typical situations are the dropping of tools on the geomembrane, the driving of autos or pickup trucks on the unprotected liner, high winds getting beneath the geomembrane during placement, the awkwardness of moving large sheets of the geomembrane into position, and so on. The geomembrane property most involved with resistance or susceptibility to tear, puncture, and impact damage is thickness. At least a linear, and sometimes exponential, increase in resistance to the above actions is seen as thickness increases. For dams the most frequently used thicknesses listed in the database are 2.0 and 2.5 mm for thermoplastic geomembranes in dams up to 60 m of hydrostatic head and up to 3.0 and 3.5 mm for some dams with hydrostatic head higher than 60 m. It must be repeated that resistance to tear, puncture and impact damage is a combination of the properties of the geomembrane (mainly its thickness), smoothness of the subgrade on which the geomembrane rests, hydrostatic head. Therefore, rather than using a single regulated value for all conditions, the minimum thickness and its subsequent properties should be related to site-specific conditions. In this regard, a generic specification for PVC-P geomembranes used in hydraulic applications is given as Table 37. Specifications for other geomembranes are in various stages of development for various applications.

8.5. CQC ITEMS

This part of quality control includes

- Acceptance of materials at site
- Acceptance of surface
- Installation of geotextile supporting the geomembrane
- Installation of geomembrane sheets/panels
- Installation of fastening system on upstream face if applicable
- Field joints of geomembrane sheets/panels
- Watertightness of perimeter seals
- Final concluding inspection of geomembrane
- Placement of cover layer if applicable
- Final concluding inspection of geomembrane sealing system (after cover placement).

The waterproofing contractor should provide the CQA manual related to the waterproofing works prior to starting of construction of the sealing system, to allow all parties involved to familiarise and become conscious of the possible mutual influences of the various construction steps. The CQA manual must address procedures for installation and inspections, tolerances, testing procedures and standards, corrective actions, and must include QC forms for all documented steps of QC. Depending on how construction is organised, some of the above steps can be performed and documented together.

8.5.1. Acceptance of materials at site

All materials will arrive at site with relevant documentation identifying their characteristics. QC shall verify by their labels that they correspond to specifications and that they are in conditions adequate for installation. Sampling for compliance testing of geomembrane materials is generally performed at this stage. Performing sampling at an earlier stage, after manufacturing, would be preferable when tests requiring long execution times are involved. This would allow if necessary rectification of products at an early stage. Transport generally does not alter the properties of the geomembrane as-manufactured, unless exceptional events occur, that would in any case be evident and detectable.

Table 37
Number of samples to be collected and tested

Value of S	S<S1	S1<S<S2	S>S2
Number of tests	0	1	$1 + (S-S2)/(2 \times S2)$

S = Total surface of waterproofing system
S1 and S2 = Values in Table 38.

Table 38
Values of S1 and S2 as used in Table 37

Value of S1 and S2	Certified products	S1 [m ²]	S2 [m ²]
Geotextiles and geonets	YES	5000	30,000
Geotextiles and geonets	NO	1000	5000
Geomembrane	YES	4000	25,000
Geomembrane	NO	1000	4000

For all geotextiles: mass per unit area, static puncture, traction in both directions.

For geotextile used in slopes, above the geomembrane: mass per unit area, traction in machine direction, permittivity, transmissivity.

For geomembranes, the list of tests as specified in the design. Usually it encloses all properties of the geomembrane.

Several international standards are available to determine criteria of acceptance, deviations, and corrective actions. Those should be described in the design.

Storage areas should be guarded and covered where local conditions require this, especially in the event that the project is delayed and it is expected that the geomembrane stays in storage for a long time. This is mainly true for geomembranes, geotextiles and geonets which shall be buried and for which UV resistance has not been specified.

The storage area and the access road shall be accessible in an all weather conditions and adequate to support the weights involved. The geosynthetics materials are supplied in rolls, with an external wrapping. Identification labels, corresponding to

the certification, shall be always visible on the external wrapping and on the roll of material. Damage related to transport and stocking shall be avoided.

8.5.2. Acceptance of surface

Acceptance of surface shall include as applicable the

- Roughness of the finished surface
- Control of correct installation and functionality of embedded items such as anchorage profiles, discharge conduits or monitoring conduits or other monitoring systems
- Control of anti-intrusion system on joints.

The criteria for acceptance should be established during the design process.

Inspection, and if necessary repairs according to CQA manual, are documented.

This step is a STOP of activities. If all parameters are not met, the construction cannot proceed.

The supporting surface shall be clean and free from any aggressive element (sharp stones, steel rods, etc) which can be detrimental to the good performance and durability of the GSS, such as tear by contact of sharp edges with the geomembrane and the geotextile, at the time of installation and/or during the operation. Compaction and bearing capacity shall be defined in the design and checked in the field by appropriate methods. This check is quite important in areas subject to passage of vehicle during construction which shall not create ruts, of depth exceeding a few centimetres. Other sensitive areas are those where preparation of support is difficult, for instance placement of soil near concrete structures such as culverts, intake towers, where smaller compacting vibrating rollers shall be used. It is suggested that the placement of this soil is made over a layer of lean concrete to overcome the problem of localized differential settlement and therefore of an additional alteration of the connection of the GSS with the rigid concrete structure.

Before the placement of the GSS the supporting layer shall be measured for flatness. Some QC plans suggest a maximum depression of 3 cm over a length of 4 m. These values can be increased when a flexible thick geomembrane is used.

For the transition between different geometric sectors (slope/slope, slope/bottom, slope/crest) a minimum radius of 30/50 cm shall be used. In general, geomembranes at the time of installation and during operation shall be always flat and in full contact with the supporting surface.

If the subgrade consists of soils which are very sensitive to erosion, it is suggested that they are stabilized by treatment with cement or shotcrete or bituminous emulsion, etc. Alternatively, the placement of an additional layer of sand or cement gravel mixed in a plant should be considered. The porous concrete extruded curbs discussed in Chapter 4 for the formation of the upstream face of rockfill dams are a suitable option.

Items embedded in concrete such as steel profiles for linear anchorage of the geomembrane or synthetic profiles for constructing the perimeter seal, shall be checked for accurate embedment, alignment, abutting, etc.

The drainage system shall be checked for free flow water flowing, with the specified slope and without any obstruction.

Anti intrusion systems for joints shall be checked for the correct order of layers and positioning of anchoring points which shall not damage the geomembrane or interfere with the movements.

8.5.3. Installation of geotextile

Unless a geocomposite (geomembrane laminated during the production process to a geotextile) is used, in many cases a geotextile or a geonet is used as a support below the geomembrane. When it is laid, care shall be given to:

- Not damage the supporting surface
- The overlapping or correct bonding of the panels; usually a simple overlapping (>20 cm) with or without seaming is sufficient. Along the slope no horizontal overlapping is allowed unless a strong mechanical bond is performed (welding or sawing)
- Keeping in place the temporary ballast until the geomembrane is laid
- Maintain the prescription and dimensions for connection to the concrete works.

QC verifies that the minimum overlapping is maintained and also the seaming and bonding, when required, are properly performed.

8.5.4. Installation of geomembrane sheets/panels

Installation is performed under weather conditions approved by the waterproofing contractor. QC verifies that sheets are placed according to the installation diagram, and are free from defects. This step is documented. In some cases the QC verifies also the weather conditions at the time of laying the rolls.

The laying diagram is a function of the geometry of the structure, of the type of geomembrane and of the equipment used. It allows the contractor optimising his installation activities, minimizing overlapping, waste and welds, easing handling of rolls and, in summary, obtaining higher quality.

Depending on their size and weight, the rolls are moved and placed in position for their unrolling, which can be done by means of equipment which is capable of lifting and unrolling. Unrolling operations should be kept at the minimum possible, to avoid damages to the subgrade and to the geomembrane.

On the slopes, the rolls are placed along the line of maximum inclination. The longitudinal overlapping of rolls shall not be horizontal, unless specific situations such as at intermediate berms or along slopes of very gentle inclination. Usually rolls are deployed from crest toward bottom to avoid degradation of support (fill dams).

To avoid any deterioration, mainly that caused by wind, after deployment the panels of geomembrane shall be temporary ballasted by sand bags or similar when a cover layer will be placed over (typical in construction of new fill dams) or immediately fastened in case of mechanical anchorage (typical of rehabilitation).

Many geomembranes, and especially those made of HDPE, have a coefficient of thermal expansion with significant values, which entails the formation of folds (in warm weather) and tension (in cold temperature). The phenomenon shall be carefully evaluated to:

- Perform the welds; the edges of the two rolls to be joined shall be at the same temperature to avoid differential shrinkage and additional folds and wrinkles after the welding
- Execute connection between the geomembrane and a concrete structure, thus to have a minimum tension
- Get a flat intimate contact at the toe of the slope when the GSS will be in service or at the time when the cover layer will be laid, to avoid burst and tear
- Be able to place in the right way the cover layer, the phenomenon of wrinkles and folds in HDPE geomembrane being accentuated by the black colour which is sensitive to heating by the sun. In HDPE geomembranes it is quite common to see waves of 10/25 cm in height which becomes extremely dangerous when a cover layer is to be placed, for instance a concrete layer 10/15 cm thick. The height of the waves shall not be more than 10 % of the thickness of the cover layer. The waves should never be folded flat at the time of the placement of the cover layer because the stress induced by the fold can locally affect the durability of the geomembrane. A geomembrane having a much lower value of the coefficient of thermal expansion (for instance an EPDM geomembrane or a PVC geocomposite) is much less sensitive to this difficulty
- Execute the connections of the geomembrane to concrete structures and in trenches at crest and toe of the slopes, which are to be made as the last operation, thus allowing time for the geomembrane to reach stable dimensions (thermal shrinkage and shrinkage after unrolling). Usually daily high temperatures shall be avoided to reduce the effect of thermal expansion.

During execution of the works, anchoring in a trench at crest requires a temporary fixation (partial blocking by gravel or use of steel nails).

8.5.5. Installation of fastening system on upstream face

Mechanical fastening systems are checked for positioning and adequate fastening to the dam face. This step is documented.

If there are doubts about the strength of the surface, it is suggested that destructive testing on some anchors is performed prior to installation of the geomembrane fastening system, verifying pull out resistance at selected locations and compliance with design. The number of tests is site specific and shall be listed in the design.

8.5.6. Assembling of geomembrane sheets/panels (field joints)

Seaming is performed under conditions approved by the waterproofing contractor. Welders and welding equipment shall be qualified and approved by executing destructive testing on trial seams. Field seams must be tested 100%. All repaired seams must be re-tested. This step is documented.

Table 39. QC testing

			Contractor		Owner	Frequency of controls	
			Worker	QC inspector		Minimum (4)	Maximum (4)
Joints	DESTRUCTIVE TESTS (shear and peeling)	INFORMATION TESTS NON STANDARDIZED Qualitative	X(1)			Once each work shift	On all welds
		Quantitative		X(2)		every 500 m if tests are OK (5)	every 100 m if some test fails (5)
		STANDARDIZED TESTS		X(3)	X(3)	every 2000 m if all Quantitative tests are OK (5)	every 1000 m if some Quantitative tests fail (5)
	NON DESTRUCTIVE TESTS	Qualitative	X(8)	X(8)		On all welds	On all welds
		Instrumental		X(9)		every 2 000 m	every 1 000 m
		Instrumental			X(9)	every 2 000 m (6)	every 1 000 m (6)
	Joints - Triple points	NON DESTRUCTIVE TESTS	Qualitative	X(8)	X(8)		On all triple points
Instrumental				X(9)		every 1500 m ²	every 750 m ²
Instrumental					X(9)	every 1500 m ²	every 750 m ²
Connection to concrete structures	NON DESTRUCTIVE TESTS	Qualitative	X(10)			On all the length of the connection	On all the length of the connection
		Instrumental		X(11)		On all the length of the connection	On all the length of the connection
		Instrumental			X(11)	20 % (7) (6)	100 % (7) (6)

(1) Destructive test, qualitative: on site, without portable extensimeter (pulling by clamps, by hand, etc)

(2) Destructive test, quantitative: performed with portable extensimeter, on a reduced number of samples and recording of data

(3) Destructive test, quantitative: standard test performed in approved laboratory. Several international standards are available

(4) Tests to be performed by a contractor with previous experience in waterproofing of dams (minimum number of tests) or by a contractor without previous experience in waterproofing of dams (maximum number of tests)

(5) means one sample collected for testing X meters of welds

(6) at convenience of the Owner designated QC inspector

(7) means percentage tested over the entire length

(8) Non destructive test qualitative: passing of a point along the seam, to detect any unbonded area, Air lance: compressed air blown along the seam to detect any unbonded area

(9) Non destructive test instrumental: vacuum box: the seam is flooded with soapy solution and a vacuum box placed over top. A vacuum is drawn on the box and the operator views the seam area through a viewing port. A stream of bubbles will indicate any discontinuities in the seam

(10) Non destructive test qualitative: passing all the nuts anchoring the batten strips with impact wrench set up to specific coupling torque

(11) Non destructive test instrumental: passing all the nuts anchoring the batten strips with torque wrench set up to specific coupling torque.

This step is a STOP of activities. If all parameters are not met, the construction cannot proceed.

The nature and method of constructing joints between rolls of geomembrane (heat, solvent, adhesives) is specific to each type of product. It is a very critical phase in the installation of the GSS and shall be carried out with maximum care only by qualified personnel.

In general, the execution of welds is not allowed under rain, snow, strong wind, mud, and in extreme temperature (air temperature less than 5° or high temperatures), unless specific arrangements are made depending on the type of geomembrane.

The surfaces of geomembrane where the joint has to be made shall be flat, clean and dry, especially in case of adhesive bonding (typical of EPDM) or of extrusion welding. This may require the use of a temporary support (for instance a wooden plank or a rigid plastic sheet) between the subgrade and the area to be joined. The temporary support is moved at the same speed as the jointing.

For all type of geomembranes a demonstration test shall be conducted at the start of the welding activity. For automatic welding machines a test for adjusting the various parameters shall be conducted when starting a new shift, to identify possible malfunctioning of the welding tool or, for some types of products (PVC-P, fPP), undue exudation which may prevent a good weld being made.

8.5.7. Watertightness of perimeter seals

Seals of the mechanical type are checked for positioning and placement of all components, all anchor bolts are tested 100% to the specified torque. This step is documented.

Seals of the insertion type are checked for positioning and execution procedures, and by pull-out testing at the specified strength at selected locations. This step is documented. Being a destructive test, a specific testing area shall be equipped with the same proposed system.

8.5.8. Final concluding inspection of geomembrane

Final inspection to check the integrity of the geomembrane should be performed after all other activities have been completed, to ascertain that there is no damage to the liner. If necessary, repairs are done. This step is documented.

This step is a STOP of activities. If all parameters are not met, the construction cannot proceed.

There are a few methods to ascertain the integrity of the geomembrane (not of the joints, which have been tested according to 8.5.6) at the end of the works. The most simple entails the visual inspection of the geomembrane to detect any possible defects, pin-hole, scratches, etc.

Other methods use a leak detection system for localization of leakage and in general for monitoring the performance of the GSS. Several configurations are

available, still under development by some companies. Because of the experimental stage of these promising systems, it is strongly recommended that the Owner performs a full scale test of the proposed system before approving it for construction.

- a) Installation of a fixed network of sensors below the geomembrane. Adopting a grid 10x10 m or less, every electrode is connected by one cable to a connection box located outside the dam. The principle of the system consists in creating an electrical field between an active electrode located inside the water of the reservoir or above the cover layer and the network of electrodes installed below the geomembrane. The electrical data corresponding to the readings for the entire dam are collected in an acquisition box located outside the dam (normally at the crest) which is permanently or on demand connected to an acquisition and interpretation software, which allows creating a map of anomalies and a precise localization of leaks through the geomembrane.
- b) Installation of a fixed network of sensors below the geomembrane and of a conductive geotextile. In many circumstances, the fixed network of electrodes is activated only by passage of water through the geomembrane, therefore the inspection cannot be carried out till the reservoir is in operation. To overcome the problem, an additional conductive layer consisting in a geotextile loaded with highly conductive carbon fibres allows reading the conductivity of the geomembrane and therefore its integrity even without the presence of water.
- c) Localization of a leak by mobile sensor, without fixed network of sensors placed below the geomembrane. The system works even in case a layer of granular material is placed above the geomembrane. An electrical field is created between one electrode placed in the dam body and a certain number of mobile electrodes (generally in form of a tripod) moved above the surface by an operator travelling over the geomembrane or cover layer. The electrical data are collected by the acquisition unit carried by the operator and then it is connected to acquisition and interpretation software, which allows the creation of a map of anomalies and a precise localization of leaks through the geomembrane. The system does not work if the cover layer is thicker than 40 to 50 cm, if it is made of concrete and in presence of steel (for instance the reinforcement in the concrete).
- d) Localization of a leak by mobile sensor, without fixed network of sensors placed below the geomembrane. Conductivity enhanced by spraying of water above the geomembrane. The system is totally similar to (c) described above. The mobile electrode explores the entire surface of the geomembrane, preceded by a spray of water which increases the conductivity of the geomembrane in the presence of a hole. The system does not work where there is a cover layer.
- e) Localization of a leak by mobile sensor, without fixed network of sensors placed below the geomembrane. Holiday detector. The system is totally similar to (c) above but there is no acquisition of data. A flat bar (usually 1 to 2 m wide) charged by an electrical field (a car battery) is moved above the entire surface. In the event of a hole in the geomembrane, the electrical circuit closes, and the apparatus gives a signal (spark, whistle, flashing light,

etc.). Its performance is reduced if the geomembrane is not in full contact with the subgrade (for instance if there is a geonet layer or thick geotextile). The system is widely used. A test to show its efficiency is required prior of performing the inspection on the dam.

- f) Optical fibre cable. The use of optical fibre cables monitoring system to detect water presence is based on the capability of optical fibre cables of sensing the distributed temperature within the cable. A highly developed measuring technique enables the analysis and the evaluation of the changes in property, with the result of a reliable temperature distribution along the fibre. The cable is placed on the upstream face, under the waterproofing liner, in horizontal or vertical loops. If there is water between the liner and the upstream face of the dam, water will travel downwards by gravity, reach the cable, and alter the “normal” temperature distribution in the vicinity of the cable. The cable senses the temperature alteration determining the point where water touches the cable, thus indicating that in the vertical area above the anomaly in temperature there is presence of water or just moisture. The fact remains that the detected water may come from upstream the geomembrane (a defect in the geomembrane, which can be found with additional visual inspection or one of the other methods suggested above) or from downstream of the geomembrane (infiltration of water from the crest, abutment, foundation, etc). An accurate understanding of the system and of the interpretation of the data is necessary to understand the source of infiltration. The system has been used on some dams (Brändbach, Winscar, and Kadamparai).

All the above systems provide the possibility of finding leaks through the geomembrane, but do not investigate the quality of the seams. Some of the systems claim an accuracy of finding a hole 1 mm in diameter with an approximation of 50 cm. The cost of the systems is relatively high compared to the entire cost of the GSS, and it is suggested that they are implemented only in case of expected poor construction or some accidental damage. An appropriate Quality Control Plan, duly implemented by expert people, is capable to provide a GSS free of defects. However, if inexperienced contractors are in charge of construction, the risk of poor results is much higher and therefore a leak detection system could be a viable option to detect defects.

8.5.9. Placement of cover layer

Before installation of the cover layer the geomembrane is inspected to verify its integrity. QC also verifies that the protection geotextile if any is correctly placed, and that other items and steps related to the construction of the cover are installed so as not to damage the geomembrane and the geotextile. This step is documented.

All kinds of vehicle traffic over the geomembrane shall be prohibited, including when the cover layer is under placement.

If the cover layer is concrete, it shall be pumped, with the delivery truck positioned outside the geomembrane area and without creating ruts in the subgrade. If the cover layer is soil, gravel or sand or rock rip-rap, it shall be at least 30 cm thick. The cover layer shall be deposited on top of the geomembrane/geotextile and never spread by pushing.

If the cover layer is made of prefabricated elements, such as concrete slabs and blocks, utmost care shall be taken when laying the precast panels over the geomembrane, to avoid puncturing. The subgrade shall be checked for its flatness, to avoid concentration of stresses at the points of contact between the prefabricated element and the geomembrane.

It is common to place a layer of geotextile above the geomembrane and below the cover layer. In the case of concrete, the geotextile provides reinforcement.

If needed, the cover layer shall be built immediately after the placement of the geomembrane, also in phases. The performance of this activity is a “STOP” point: if not performed in line with the requirements of the QCA the construction of the GSS shall be stopped.

8.5.10. Final concluding inspection of geomembrane sealing system

Final inspection verifying integrity of the geomembrane after the placement of the cover layer should be performed, to ascertain that no damage has been caused to the liner. This step is documented.

The final concluding inspection can be carried out with the help of one of the leak detection system described at 8.5.8.

8.5.11. Documentation

All documentation is signed and kept by all parties involved.

9. GUIDANCE ON TECHNICAL CONTENT OF CONTRACTS

This chapter outlines the main aspects to be considered in the tender and in the contract for use of a geomembrane sealing system in a dam.

9.1. GENERAL CONSIDERATIONS

The goal of a geomembrane sealing system is to provide or restore imperviousness to a dam. The efficiency, reliability and durability are based on a variety of factors, which include the technical value of the design of the waterproofing system, the quality of the materials and the workmanship, the capability of the waterproofing contractor. Technical specifications must consider all these factors.

It is recognized that to obtain the best quality at the best price, it is recommended to split the waterproofing works from the other works typical of a general contractor, such as the earthworks or concrete works, for instance in case of a fill dam or an RCC dam. Splitting is recommended because the activities are quite different.

On the other hand, practically, to address the problems of interaction among the various contractors and the problems related to warranty, for the Owner it is easier to deal just with one contractor (or joint venture). In case of new construction, generally it will be the main contractor for the earthworks/concrete works. In case of dam rehabilitation, the contract will be more preferably with the waterproofing contractor.

The Owner may decide to provide during the tender stage the detailed design of the waterproofing system or to provide the main guidelines and then leave to the contractor the task of providing the detailed design, which shall be approved by the Owner. Considering that in most countries the construction and the rehabilitation of dams is under the inspection and control by some independent authorities in charge of safety of the structures, the outcome of the works shall be in line with the regulations and therefore it is of paramount importance that the Owner, in case he does not provide the detailed design during the tendering stage, informs the bidders of the scope of the works and the main guidelines of the design, which shall fulfil the requirements of the Owner and of the Authorities. This task could prove to be extremely complicated and time consuming.

Despite the geomembranes technology in dams has been available since the late 1950ies and an enormous number of projects have been successfully executed in all continents, still many engineers consider it as a “new technology”. Furthermore, not many engineers are knowledgeable of the chemistry required to understand the properties, behaviour and expected performance of geomembranes and of synthetic materials in general.

Therefore the owner, who should be the most interested in using the technology because of the technical and economical merits, shall develop the design

or at least the guidelines for the design and envisage the minimum requirements so that all bids fall within a range of quality satisfactory for the project and such as to assure that the outcome of the waterproofing project is in line with the requirements of the authorities and respectful of the criteria of safety, durability, capital investment and cost of maintenance.

The geomembrane is the main item of the waterproofing works. The efficiency, reliability and durability of the waterproofing works largely, but not only, depend on the properties and quality of the selected geomembrane. The specifications shall be very accurate in describing the type and properties of the geomembrane.

The need for better and more detailed specifications must be stressed. Even in up-to-date design documents the chemical characteristics of the synthetic materials (like amounts of additives other than the base resin, percent of crystalline matter, molecular weight, oxidation time, etc.) are seldom mentioned, but they are essential for a proper definition of the product, of its characteristics: the future performance depends on those.

The type of installation (exposed or covered) and the selected type of geomembrane (PVC, EPDM, CSPE, Polyethylene, etc) has implication on the type of subgrade preparation, type of fastening, type of welding, associated QC, method of placement, possibility of repair, etc. In principle once the design is done based on a specific type of geomembrane, it would be extremely delicate to switch to another type of geomembrane as most of the other elements of the design will be affected. Once the design is completed the type of geomembrane can be changed only if ALL the other elements of the design are checked and satisfied.

The interaction among the various elements of the waterproofing system is critical, and the best assurance that the owner can have that his project will then perform according to his expectations is to use materials already largely tested in very similar types of application, produced by organizations with specific experience in the product, installed by organizations with previous experience in application in dams of similar size.

External loads in a dam are usually much more demanding than loads applied to a geomembrane in roofing, waste disposal landfills, traffic tunnels, in foundation or in underground works in general, where normally the water head acting on the liner is either negligible or occasional. Materials and organizations which have been proved to be successful in these types of application may lack of the indispensable knowledge to work in dams, where the geomembrane is permanently exposed to constant water head, which can be extremely high, to extreme temperatures with great variations, to active joints, to deformable structure, to impacts from the external environment, to difficult access, to problematic conditions if a repair is needed, to required long durability.

Depending on the type of dams, the global cost of the waterproofing works is very different if the geomembrane is left exposed or is covered.

In a covered geomembrane system the cost of the geomembrane itself and of the installation can be less, but the extent of subgrade preparation works and the cost of installation of the cover layer may be huge. Also the QC system is very expensive because it applies not only to the geomembrane system but also to the installation of the cover layer. In case of an accident, an exposed geomembrane

system can be effectively, easily, and quickly repaired at a minimum cost. In a covered geomembrane system a defect will be found with extremely complicated, expensive, and time consuming methods, and then the repair will be extremely expensive as most of the cost will be associated to the removal and reinstallation of the cover. This explains why the QC in a covered system is more demanding than in an exposed one, due to the need of making the work absolutely right at the first time as there is no reasonable second chance.

With the current quality of geomembranes available, suitable for extremely long term exposure, the need of a cover layer shall be justified from the technical and economical point of view.

The internal distribution of cost varies enormously between the geomembrane system itself (materials + installation) and the associated works (subgrade preparation, drainage, cover layer). A thicker, more performing and usually more expensive geomembrane provides longer durability and less civil works for preparation of subgrade.

In an exposed geomembrane system, the major costs are related to design, quality of the geomembrane and drainage system, fastening system, installation.

As in all other engineering fields, in waterproofing of dams there is no miracle product, one product that fits all needs. As the geomembrane is just part of the sealing system, it does not make sense selecting a waterproofing system based on the price of the geomembrane only.

First the owner shall decide if he wants an exposed or covered geomembrane system. If it is covered, there is a larger number of geomembranes which may be suitable, as the requirements for resistance and durability to the environment is less, therefore their cost is less, but the owner shall pay for the cost of the cover layer and the associated risk of damages during its placement. In most cases it is more difficult to design the cover system than the geomembrane system itself. The cover layer usually is by far more expensive than the geomembrane, and the cost for QC to avoid damages during its placement shall be properly evaluated.

If the geomembrane is exposed, the types of geomembranes suitable and that can provide evidence of their durability in the environment are limited. These geomembranes are usually slightly more expensive but no additional investment for cover layer is required.

In general a geomembrane which is suitable for exposed application would be too expensive if buried. A geomembrane which is less expensive and largely used with a protection layer is not suitable for an effective and long lasting exposure unprotected.

Another important aspect associated with the geomembrane technology is the consequence of a failure. Standard mature technologies like concrete do not provide an effective and quick response monitoring system for assessing efficiency. The geomembrane technology will allow immediate monitoring of the presence of any defects, even very small, thanks to the water collection and discharge system which in hydraulic structures should always be part of a GSS. Therefore the geomembrane technology will provide an immediate way of checking the quality of the works performed.

With a mature and well spread technology such as concrete, bad construction can still occur. Failures or at least defects are common and generally accepted as a normal occurrence.

When using the geomembrane technology, in consideration of the great knowledge and experience required, people expect that it will be free of defect. A minor inconvenience that may occur to a geomembrane system will not be overlooked and criticism will be high. Poor craftsmanship in the concrete technology is deemed to be a possibility, but would not be accepted with the geomembrane technology.

Owners, designers, suppliers, installers shall be aware that the geomembrane technology can provide a high degree of watertightness which is almost impossible to achieve with any other construction methods.

When designing with concrete, accurate studies are normally carried out for determining the properties of the concrete, the thermal stresses, the behaviour over the time, the reinforcement required, the treatment of the joints, the placement methods, etc.

Exactly the same concept shall be applied for geosynthetics. The right loads shall be assumed, the geomembrane, the fastening system, the drainage and its discharge shall be designed and selected accordingly. Then the placement method shall be decided and finally a comprehensive Quality Control plan established. All details of the waterproofing system are to be integrated in a whole concept. As in the current programme of studies for civil engineers teaching of geosynthetics is not common practice, lack of specific knowledge shall not be an excuse for poor design and poor construction of geomembrane sealing systems. In these days accurate design methods have been developed, extensive research on materials has been carried out, QC system for the entire process are available, reliable installation techniques have been implemented.

In these days, no design of challenging civil structures is done by engineering companies without documented previous experience in similar projects. The same shall apply for geomembranes systems in dams.

In these days, no large civil construction project is awarded to companies lacking of experience, personnel, trained staff. This shall be even truer for geosynthetics in general and especially for geomembranes. Geomembranes projects in dams shall be performed by companies with documented previous experience in similar projects, both for type of work (geomembrane exposed or covered) and size (quantity of liner to be installed vs. time available, fastening system used, type of subgrade, height of dam, type of environment, etc).

Selection of geomembranes entails qualification of supplier of resin and manufacturer of the geomembrane. Depending on the type of resin used for the geomembrane, the qualification of supplier may be critical. A resin like polyethylene is supplied directly by very large chemical factories, the resin is quite standard and therefore the quality of the product supplied is largely within the specs. A resin like PVC, which statistically is the resin mostly used in geomembranes for dams and hydraulic structures, is prepared according to almost an infinity of possible formulations, therefore a previous documented specific experience of the supplier is a very important point to demonstrate the capability of the supplied

product to meet the requirements of the expected durability. However previous experience by itself is not yet sufficient to guarantee the quality and the performance of the end product.

Owners, designers, suppliers, installers have now all tools to construct very effective projects, from the technical, performing, durability and cost point of view. The way to obtain the goal is by preparing adequate procurement specifications to be inserted in the tender documents during the bidding phase and that shall be incorporated into the contract documents.

The technical and administrative clauses which are the base for the tender shall provide basic guidelines on the requirements and/or a precise detailed list of conditions that the tenderers shall satisfy.

At the end of the tender process, the owner shall obtain precise detailed answers to the following list of requirements. Some of the items are to be supplied by the Owner (general information, par. 9.9.1), some by the tenderer (programme of works, references, guarantee).

For the remaining items there are two options:

a) They can be fully specified by the Owner (technical specifications) and the tenderer shall just comply, or

b) The Owner shall provide basic guidelines of what he would consider as an acceptable solution and then the tenderer shall provide a detailed proposal, fully supported by drawings, calculations, technical data sheets, tests by independent laboratories, samples, etc.

From the technical point of view, it is strongly suggested that the Owner adopts the first option a), detailed design. The advantage is that the design will be fully in line with the requirements of the project and compliant with the rules of the authorities. As many conceptual solutions for geomembrane sealing systems are patented, the Owner can negotiate in advance the cost for using the technology. Evaluation of the proposals is more simple and fair as all tenderers use the same inputs. The cost incurred by the contractors to prepare the tender is less and this would attract more competition. Nevertheless the Owner shall still grant the contractors to submit in addition to the basic solution, which all contractors shall quote, one or more alternative proposals which shall however meet the main requirements of the basic solution. The geosynthetics community is very active and new ideas could have been developed between the time of the first preliminary design used to establish the tender and the time of tender. The Owner shall indicate which are the basic requirements to be met by the alternative proposals.

A list of the items which shall be provided by the Owner to the tenderers is enclosed in Annex 9.9.1.

9.2. TECHNICAL SPECIFICATIONS

Whoever is in charge of designing the waterproofing system, either the Owner or the contractor, the following items shall be included in the final detailed design.

9.2.1. Materials

Geomembrane Sealing Systems for dams usually comprise various elements, each of them having a specific function, and which are manufactured from different materials. Depending on the Sealing System the involved materials vary, however there are main groups of materials that can be addressed as follows:

- Synthetic materials
- Materials for fastening (exposed geomembrane) or for ballasting (covered geomembrane)
- Materials for drainage (synthetic or natural)
- Other materials (for perimeter seal, penetrations, ventilation, etc).

In general, the requirements for all involved materials need to be specified. This can be done by either stating values for properties according to standards, or by description of the required behaviour under defined conditions.

A definition of how to prove the properties/requirements is needed.

9.2.1.1. Synthetic materials

The geomembrane is the main item of the waterproofing works. The efficiency, reliability, and durability of the waterproofing works depend on the properties and quality of the selected geomembrane. The specifications shall be very accurate in describing the type and properties of the geomembrane.

List of General Specifications applicable for Geomembranes and Geocomposites, depending on the type of geomembrane and if exposed or covered:

- Chemical characteristics
 - Resin (origin, identification, production date)
 - Molecular weight
 - Percent of crystalline matter
 - Amounts and type of additives other than the base resin.
- Physical characteristics
 - Thickness (geomembrane only and geomembrane & geotextile, in case of geocomposite)
 - Mass per unit area (geotextile only)
 - Geotextile break tension
 - Geotextile break elongation
 - Geomembrane break tension
 - Geomembrane break elongation
 - Tear resistance
 - Puncture resistance
 - Low temperature/brittleness
 - Volatile loss
 - Water extraction
 - Dimensional stability (test at high temperature, variable depending on the product)
 - UV resistance (test at high UV exposure)

- Environmental properties
- Specify environment conditions that liner must sustain.

9.2.1.2. Fixation materials

The geomembrane can be left exposed and in such a case it is mechanically fastened by means of steel or plastic profiles, or it is covered and in such a case the covering material shall be specified, including the placement method.

- For mechanical fastening
 - Chemical, metallurgical characteristics
 - Type of metal
 - Identification of metal by no. or name
 - Type of protection / coating
 - Physical characteristics
 - Stress characteristics
 - Strain characteristics
 - Resistance against various impacts.

9.2.1.3. Drainage materials

The drainage material can be synthetic such as geonet, geotextile, etc., or natural, such as gravel.

- Synthetic material
 - Mechanical characteristics
 - Structure
 - Polymer
 - UV-stabilizer
 - Thickness under various compressive stresses
 - Dimension
 - Tensile strength
 - Elongation at yield
 - Hydraulic characteristics
 - Transmissivity under various compressive stresses.
- Natural material
 - Size curve
 - Permeability
 - Type of grains (crushed, rounded, etc)
 - Compaction.

9.2.1.4. Other materials

Other materials are needed to complete the installation. The most usual ones are the resin used to prepare the bedding on which the watertight perimeter seal is anchored, the gasket used to distribute compression forces, the chemical and/or mechanical anchors used to fasten the mechanical profiles to the subgrade.

- Resin
 - Origin, base
 - Setting time.
- Rubber gaskets
 - Origin, base
 - Cellular structure
 - Density
 - Shore hardness
 - Compression – deflection at various extent
 - Compression set
 - Water absorption
 - Temperature range
 - Linear shrinkage after specified time and temperature
 - Ultimate elongation
 - Tensile strength
 - Tear resistance
 - Resistance against various substances (ozone, oil, solvents, acid, alkali etc.)
 - Resistance in various conditions (UV-rays, freeze, heat etc.).
- Chemical anchors
 - Type of resin, mechanical characteristics
 - Conditions of supply (glass phials, cartridges, etc).
- Mechanical anchors
 - Type of steel, mechanical characteristics.

9.2.2. Sealing system

9.2.2.1. Description of constituents

Description of constituents of the waterproofing system and their function.

9.2.2.2. Surface preparation

Description of surface preparation and criteria for acceptance of surface. The acceptable roughness of the surface on which the waterproofing system is installed is function of the type of geomembrane, of anti-puncturing layer (if any), of drainage layer, of mechanical properties of the geomembrane, of hydraulic head. It is more critical to lay a stiff geomembrane on a very rough surface with a few meters of hydrostatic head (for instance an HDPE geomembrane on a 50 mm maximum size aggregates subgrade and 10 m of water head), rather than a flexible thin geomembrane on a very smooth surface (for instance a PVC geocomposite on the even concrete face of an RCC dam, with 200 m of water head). It is recommended to perform test in a hydraulic vessel of the proposed waterproofing system on the most typical and worst subgrade which is expected in the field. For definition of the roughness of surface, a grade of finishing can be identified in the Technical Guidelines prepared by the International Concrete Repair Institute (Guideline No. 03732, January 1997, “Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for

Sealers, Coatings and Polymer Overlays”). Usually a finished surface having a Concrete Surface Profile 5 (CSP 5) or lower grade (< 5) is acceptable.

9.2.2.3. Joining of sheets/rolls

Specify type of joining (single/double track, automatic/manual), testing method and acceptance criteria for joints. Several standards are available.

9.2.2.4. Perimeter seal

Specify conditions. Especially in rehabilitation, the boundaries of the waterproofing system are placed across contraction joints of the existing upstream face. If appropriate measures are not taken, during operation the water may by-pass the perimeter seal of the new waterproofing system and enter into the relevant drainage system. The drainage system would then convey water to the discharge/measuring point which can induce to think of a possible defect in the geomembrane system. In reality such water is due to the fact that the plane of the new waterproofing liner (the exposed face) is more upstream than the previous plane (the waterstops embedded in the concrete). Therefore maximum care shall be devoted to the design of the interception at the boundaries of the new synthetic liner and the vertical/horizontal joints and fissures.

When defining the criteria of acceptance of the new liner consideration shall be given to the interception, which may convey water inside the waterproofing system, without the waterproofing system being responsible for the infiltration.

9.2.2.5. Drainage system

Scope of the drainage system shall be defined, for instance which type of event can determine a flow of water in the drainage system and amount of flow (for instance a tear in the geomembrane). In consideration that the drainage media is subject to compression by the water head, transmissivity of the drainage media under full operating conditions shall be assessed. The discharge system shall be compatible with the total amount of water which may be collected by the drainage media and its maximum discharge capacity detailed in the design.

9.2.2.6. Fixation

Anchorage of the geomembrane shall not induce abnormal stresses in the waterproofing system and shall be able to support its own dead weight and all external loads (ice, wind effect, waves, drawdown). Evidence of the fastening system being able to support all external loads and the relevant factor of safety shall be provided, even through calculations. In case of a cover layer, before approval is given for its placement to start, full scale placement procedure shall be tested and integrity of the synthetic liner checked by removal of the cover layer.

9.2.2.7. Experience of proposed material

The proponent shall provide references of previous application of the geomembrane material and of the geomembrane sealing system in general in similar conditions.

Evidence may be given through:

- Examples of previous application, explaining working condition of the geomembrane.

Useful references are those in which the proposed material has been in use for at least the past 10 years and the satisfactory performance documented and/or confirmed by owners and/or independent bodies. See Annex 9.9.2.

9.2.2.8. *Experience of the proposed fastening system*

The proponent shall provide references of previous application of the proposed system in similar conditions.

Evidence shall be given through:

- List of similar projects in which the proposed system has already been used. Applicable references shall be related to previous applications in dams of similar type (concrete, RCC, fill, etc) and with similar height (at least 70 % of the height of the project under tender), similar quantity of surface (at least 50 % of the surface of the project under tender and similar rate of installation time (at least 70 % of the rate of installation, in square meters per month, required for the project under tender).

Mandatory references are those in which the proposed material and fastening system has been in use for at least the past 10 years and the satisfactory performance documented and/or confirmed by owners and/or independent bodies. To make sure that the installer has maintained the experience gained in old projects, at least one project in which the proposed system has already been used shall not be more than 3 years old.

Submittals to include evidence of efficiency of seal.

See Annex 9.9.2.

Minimum requirements are suggested in Annex 9.9.2.

9.2.3. Ballasting layer

The proponent shall specify type of the proposed ballasting layer, placement method, dimension and method of how a full-scale test of placement of ballasting layer will be conducted to determine constructability.

9.3. INSTALLATION PLAN AND SCHEDULE

The proponent shall provide a detailed programme of works, showing weekly progress of each task of the installation.

9.4. QC PLAN

A testing protocol shall be established for quality control during manufacturing, and for compliance of the product at installation. The protocol identifies the parts of

the system which shall be tested, properties to be tested, test methods, frequency of testing, and entity that executes the tests.

It is recommended that the selected geomembrane and all main materials be produced under certified quality control procedures (ISO 9001 or equivalent). Evidence of ISO 9002 or 9001 certification shall be enclosed in the tender submittals. In most recent projects, auditing of such procedures by the designer/consultant/owner has been a requirement for acceptance of the material.

Concerning compliance testing, at least one complete characterisation of the geomembrane material should be provided for each produced lot.

Specify independent laboratory to perform identification and compliance tests and applicable standards.

Tender submittals should include foreseen quality control at installation and outline the experience of the appointed QC body.

The waterproofing contractor shall perform the installation of the new waterproofing liner according to approved Method Statements. ISO 9001 certification or equivalent is not deemed to be sufficient for approval of the installer. In the tender, the proponent waterproofing contractor shall provide a summary of the activities to be covered in the Quality Control.

9.5. ACCEPTANCE CRITERIA OF PERFORMED WORKS

Acceptance criteria are based on recognition of the quality of the works performed or on the performance in operation of the geomembrane sealing system or on both.

9.5.1. Liner

Some examples

- Absence of puncture, tears, holes or other damage in the liner
- In the concrete section, uniform adherence of the liner to the concrete, with no sagging or wrinkles
- In the natural slope section, conformation of the liner to the natural slope, with no zones with excessive tension or sagging or wrinkles
- Absence of folds or undulations in the liner
- Inspection of the liner by Electric Holiday Detector. This technique to perform inspection on the liner can be used only in dry conditions and does not provide reliable results in case there is a geonet or a thick geotextile between the geomembrane and the subgrade. Visual inspection is a valid solution in all conditions.

9.5.2. Fixations

An example:

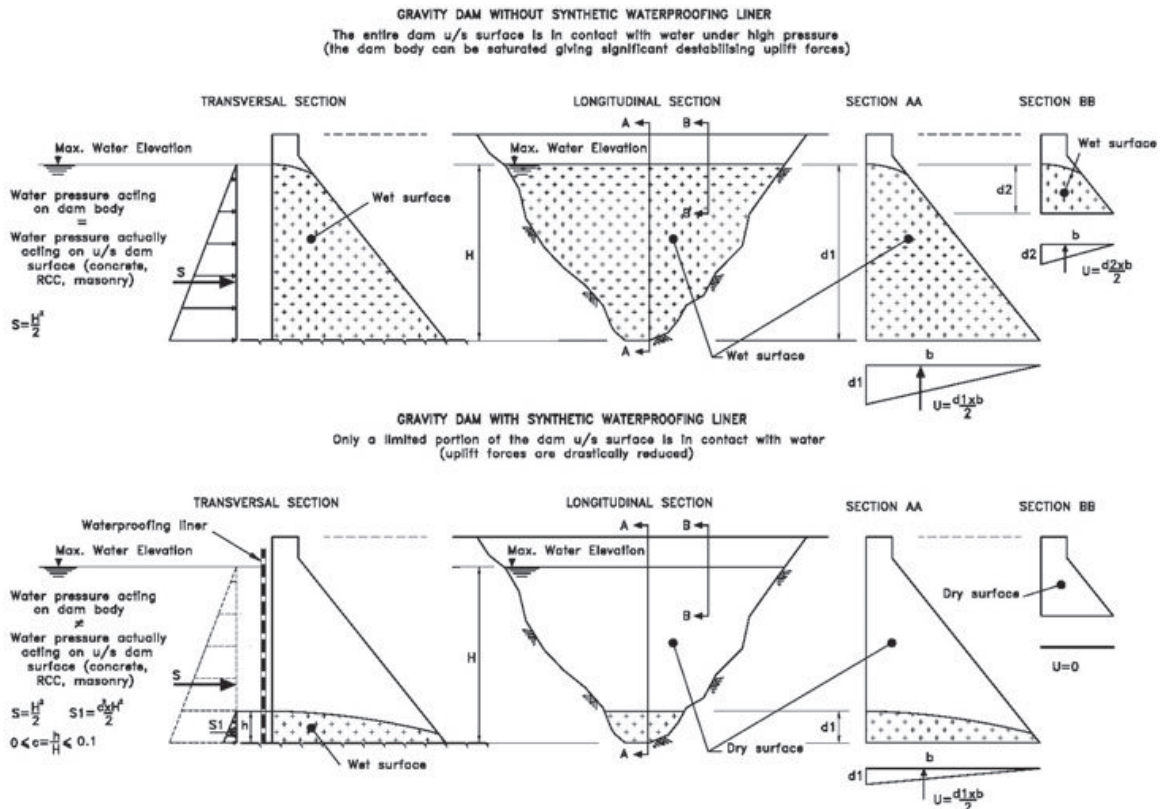
- Control of specified torque for the anchor bolts of the anchorage profiles.

9.5.3. Seams

Continuity and watertightness of seams.

9.5.4. Leakage

The upstream face is not subjected to infiltration of pressure water from the reservoir if there is no accumulation of water between the synthetic liner and the subgrade, or if the accumulation entails a minimum hydrostatic head compared to that exerted from the reservoir. Among acceptance criteria, it has become common to specify also the total accepted leakage from the upstream face or from each compartment. As the rate of leakage can be affected by water by passing the perimeter seal, it is strongly suggested that the rate of leakage is associated to reading of pressure of water behind the geomembrane sealing system in front of the drainage discharge pipe. The hydrostatic head in behind the geomembrane shall be just a few per cent of the full hydrostatic level in the reservoir. The area of the upstream face still exposed to water would remain a fraction of that without the GSS and the applied hydrostatic head minimum, thus enormously reducing the potential for water infiltration in the dam body through the upstream face. Furthermore, being recognized that infiltration of water in the drainage of the GSS may come from other sources other than the geomembrane, for instance from the foundations, the abutments, the crest, untreated joints, downstream face, etc, it would be wise to associate the measurement of the leakage and the hydrostatic head behind the geomembrane with a system monitoring the integrity of the geomembrane (for instance a system based on geo-electrical measurement).



It must be understood that the leakage collected in the GSS, being collected at the upstream face, is totally different from the leakage that would be collected in the drainage gallery if no geomembrane is installed. Theoretically the upstream face and the entire dam body are much drier with a GSS delivering a rate of leakage much higher than what would be collected in the drainage gallery if no geomembrane were installed. To make the rate of leakage from the GSS comparable with that of a traditional approach with no geomembrane, major works such as additional grouting of the foundations, treatment of joints, construction of a new plinth, etc. may be necessary, as shown in the various conceptual sketches of Chapter 5 and discussed in the same chapter. The additional works may entail consistent increase of the costs.

9.6. WARRANTY

Generally warranty is requested for the materials as well as for installation. A typical Warranty Certificate is enclosed in Annex 9.9.3.

It is typical to request a 10 years warranty on materials and 2 years warranty on installation. In fact a defect in the installation would appear at the first impoundment while decay of properties of materials would appear only after a certain number of years.

In some cases, the Owner has requested that in the warranty period the installer makes an inspection of the performed installation at periodical intervals, for instance one, two, five, ten years after the installation has been completed.

9.7. BILL OF QUANTITIES AND CONDITIONS

In almost every waterproofing project there is the need for peripheral and/or preparatory civil works that are indispensable for the execution of the waterproofing works, as well as other works like e.g. monitoring. It is recommended to group the respective items in a separate section of the bill of quantities, because usually different contractors/subcontractors offer prices for these works, which are favourably represented in the various sections of the bill of quantities.

The separation into sections should comply with the following suggestion:

- Preparatory & peripheral civil works
- Providing access and site storage areas, energy supply, water supply, sewage disposal, demolition and disposal, surface cleaning and disposal, surface preparation, joint treatment (e.g. sealing, injection, cleaning etc.), renewal of existing parts (e.g. crest, spillway etc.) or construction of additional parts (e.g. plinth, grout curtain, gallery, drainage collection system, drainage outlets etc.) of the structure
- Peripheral steel works
- Gates, valves etc.
- Peripheral instrumentation works for monitoring
- Monitoring system, sensors, electricity supply, carrying out of measurements
- Waterproofing works

Liner, fastening, drainage, perimeter seal, design.

In view of possible changes, each section should comprise all material, labour and general costs (mobilization, demobilization, site management, insurances etc.) related to the complete and independent execution of the respective works.

In general, a detailed description of the respective items is necessary to have a clear comparison between the competing tenders and a doubtless basis for the acceptance of the works.

9.8. CONCLUDING REMARKS

There is now considerable experience with the use of geomembranes in geotechnical engineering, including high dams. The geosynthetics industry has now developed a wide range of materials that have many fields of application for the development of dams, particularly for drainage and controlling seepage. These materials provide opportunities for saving in cost and time of installation, particularly for new dams and rehabilitation. The efficiency of conventional lining techniques using rigid materials may easily decline over a few years.

In spite of their many successful, even spectacular, applications, geomembranes are not magic products. They must be treated like any other construction material. In particular, applications must be carefully designed and constructed and this is very true in case of dams' applications where failures may have serious consequences. As described in various parts of this bulletin, there are aspects of dams projects that require considerable expertise during design and installation of geomembranes: connection between liner systems and rigid structures, drainage system behind the geomembrane, stability along soil-geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic interfaces (for instance in case of a cover layer in an embankment dam), stresses during installation, stresses in services caused by differential settlements, opening of joints, stresses due to uplift by wind in case of exposed geomembranes, thermal expansion-contraction in the geomembrane which would provoke waves, wrinkles, folders which are detrimental to the durability, etc. Also very strict quality assurance procedures must be implemented during construction by qualified teams. While it is important for engineers designing dams projects to be aware of the many possibilities offered by geosynthetics and in particular by geomembranes, it is equally important for them to be aware of the need for careful design when geomembranes are used. Clearly, information on geomembranes is essential to ensure the safe design and construction of dams incorporating geomembranes.

Lining dams under operation is a very complex operation especially because repair works done in the dry would require draining the reservoir and so affecting water supply to people and farmers, energy production, wildlife in the downstream river. Underwater placement of geomembrane offers the unique opportunity to allow repair of dams negating the need of dewatering the reservoir.

In general the use of flexible linings should be examined to reduce the construction period and to improve the overall quality of the waterproofing liner, especially in case of adverse conditions during installation and in case of demanding service conditions.

Proper selection of material and experienced designers and installers is the major step to ensure a properly performing lining system using flexible material.

The watertight material, say the geomembrane, is one of the least significant cost components of a lining system. Quality, not cost, should be the major consideration in the selection process. The wisdom of the quotation* below applies particularly to this material:

*“It is unwise to pay too much, but it is worst to pay too little.
When you pay too much, you lose a little money- that is all.
When you pay too little, you sometimes lose everything
because the thing you bought is incapable of doing the function it was bought to do”.*

* H. Plusquellec – “Application of Geosynthetics in Irrigation and Drainage Projects” – International Commission on Irrigation and Drainage.

9.9. ANNEXES

9.9.1. Check List

Main data needed to establish a design/proposal for a waterproofing system
(More data are provided, more accurate will be the proposal)

Check-list					
	Embankment	Concrete Rehab	RCC	Joints	Underwater installation
General					
Name and full contact details of person preparing this check list	X	X	X	X	X
Name of project	X	X	X	X	X
Name of Owner	X	X	X	X	X
Name of Designer	X	X	X	X	X
Name of Contractor	X	X	X	X	X
Location and closest cities and airport	X	X	X	X	X
Type of dam and main use	X	X	X	X	X
Expected time for completing the design of the dam (only for new construction)	X		X		
Expected time for starting the construction of the dam (only for new construction)	X		X		
Expected time for completing the construction of the dam (only for new construction)	X		X		

Check-list (continued)					
	Embankment	Concrete Rehab	RCC	Joints	Underwater installation
Environment					
Total precipitation in the year, mm	X	X	X	X	X
Distribution of precipitation: rain and snow, average annual precipitation and distribution per month, mean monthly, in mm	X	X	X	X	X
Values of the maximum 24-hours (daily) rainfalls. Highest daily maximum in each month, in mm	X	X	X	X	X
Snow cover: max thickness and months	X	X	X	X	X
Ice: max thickness and months	X	X	X	X	X
Air temperature: minimum and maximum for each month (°C/°F)	X	X	X	X	X
Humidity	X	X	X	X	X
Prevailing winds	X	X	X	X	X
Maximum experienced wind speed	X	X	X	X	X
Maximum design wind speed	X	X	X	X	
Temperature of water	X	X	X	X	X
Chemical properties of water and PH	X	X	X	X	X
Load of sediments in the water	X	X	X	X	
Other specific constraints	X	X	X	X	X
Operation of reservoir (fluctuation of level over the year)	X	X	X	X	X
Maximum design earthquake acceleration coefficient and equivalent seismic event expressed in Richter scale	X	X	X	X	X
Main data					
Maximum height of the dam	X	X	X	X	X
Elevation of crest	X	X	X	X	X
Elevation of foundation (upstream)	X	X	X	X	X
Length of crest	X	X	X	X	X
Net width of crest (can a truck pass on it?)	X	X	X	X	X

Check-list (continued)					
	Embankment	Concrete Rehab	RCC	Joints	Underwater installation
Height of parapet	X	X	X	X	X
Inclination of upstream face	X	X	X	X	X
Existence and dimension of perimeter plinth	X	X	X	X	X
Existence and dimension of inspection gallery	X	X	X	X	X
Existence, types and dimensions of openings in the upstream face (i.e. bottom outlet)	X	X	X	X	X
Minimum elevation of inspection gallery	X	X	X	X	X
Type and location of watertightness system of foundation and abutments (grouting curtain, blanket, etc.)	X	X	X	X	X
Net surface of upstream face in m ²	X	X	X	X	X
Maximum expected settlement of the structure	X	X	X	X	X
Maximum expected rotation of blocks of the structure	X	X	X	X	X
Description of upstream face	X	X	X	X	X
Description of type of mixes used in the various parts of the dam and in the upstream face (GE-RCC, GEVC, etc.)			X		
Waterproofing system - current design					
Description of current design, including type and thickness of layers	X		X	X	X
Type of joints (waterstop & drilled drains, etc.)	X	X	X	X	X
Spacing of joints	X	X	X	X	X
Maximum expected opening of joints (opening, rotation, settlement)	X	X	X	X	X
Estimated time for construction of the waterproofing (if not together with the dam body)	X	X	X	X	X

Check-list (continued and end)					
	Embankment	Concrete Rehab	RCC	Joints	Underwater installation
Waterproofing system - geomembrane					
Net surface of geomembrane to be installed on the upstream face in m ²	X	X	X	X	X
Which advantage are expected from the geomembrane system, rank in order of preference (1 for the most important)	X	X	X	X	X
• watertightness	X	X	X	X	X
• lower cost	X	X	X	X	X
• shorter construction period	X	X	X	X	X
• reduced maintenance (cover future cracks)	X	X	X	X	X
• replacement of standard materials (clay, concrete, GEVC, etc.) not conveniently available	X	X	X		
• resistance to earthquake	X	X	X	X	X
• simplified construction	X	X	X	X	X
• no need of cooling plant			X		
Description of upstream face and mainly of the type of finishing layer on which the geomembrane should be installed (flat, rough, honeycomb, spalling concrete, etc.)	X	X	X	X	X
Documents to be provided					
Drawings (better if AutoCAD): main cross sections, plan and upstream elevation, detail of plinth, detail of appurtenances and openings, detail of joints	X	X	X	X	X
– Construction report	X	X	X	X	X
– Video	X	X	X	X	X
– Photos	X	X	X	X	X

9.9.2. Compliance to Tender Requirements

Tender Requirements	Compliance of the proponent	Evidence by
List of at least # dams (# specified in the tender documents) lined with the proposed GSS including dams of similar type (concrete, embankment, RCC, etc.)	List of all projects accomplished on dams of similar type, specifying type of geomembrane material, drainage, quantity installed, years of installation, full coordinates of the Owner or representative who can confirm data, etc.	The Proponent
At least one dam should be 70% the height of the dam under tender	Completion certificate or equivalent	Owner / his Representative / Engineer
At least one dam should have an upstream face $\geq 50\%$ the surface of the dam under tender	Completion certificate or equivalent	Owner / his Representative / Engineer
At least one dam should have been lined at a rate of placement which is $\geq 70\%$ of what required for the dam under tender (in square meters/month)	Completion certificate or equivalent	Owner / his Representative / Engineer
At least one dam should have the proposed material and fastening system installed for at least the past 10 years with satisfactory performance	Completion certificate or equivalent and statement after 10 years in operation	Owner / his Representative / Engineer / independent bodies
At least one dam should have the proposed material and fastening system installed for no more than in the past 3 years	Completion certificate or equivalent	Owner / his Representative / Engineer

9.9.3. Example of Warranty

Reviewed by: Donald J. Weiss, Esq.
General Council for GSI

ABC COMPANY INC. LIMITED WARRANTY

ABC COMPANY
address
phone

Warranty No: 102-2003 _____
Project : XYZ Dam _____
Effective Date: Upon Issuing of Notice of Substantial Completion of
the ABC system by CLIENT _____

PURCHASER NAME: FGH (CLIENT) _____ PROJECT NAME: XYZ Dam _____
ADDRESS _____ PROJECT ADDRESS/LOCATION: _____
CITY, STATE, ZIP, COUNTRY _____ CITY, STATE, ZIP, COUNTRY _____

GEOMEMBRANE TYPE/DESCRIPTION: PQR 1234 for XYZ dam geomembrane system
including geomembrane drainage system _____

ABC COMPANY Inc. warrants and certifies the geomembrane system at XYZ dam installed by ABC COMPANY Inc. to be free from manufacturing defects (as defined by the contract's material specifications) and to be free from installation defects and to be able to withstand normal weathering and operating conditions for a period of 730 days (2 years) from the above effective date.

This Limited Warranty does not include damages or defects in the PQR geomembrane resulting from acts of God, casualty or catastrophe including but not limited to: earthquakes, floods, piercing hail, tornadoes or force majeure. The term "normal use" as used herein does not include, the exposure of PQR geomembranes to harmful chemicals, abuse of PQR geomembranes by machinery, equipment or people; improper site preparation or covering materials, excessive pressures or stresses from any source. The parties expressly agree that the sale hereunder is for commercial or industrial use only.

Should material defects or installation defects or premature loss of use within the scope of the above Limited Warranty occur, ABC COMPANY Inc. will repair or replace the PQR geomembrane at no additional cost to the Purchaser for the duration of the warranty period. ABC COMPANY Inc. will have the right to inspect and determine the cause of any alleged defect in the PQR geomembrane and to take appropriate steps to repair or replace the PQR geomembrane if a defect exists which is covered under this warranty. This Limited Warranty extends only to ABC COMPANY Inc.'s and its subcontractors geomembrane and geomembrane installation itself, and does not extend to the installation of the geomembrane by third parties.

Specifically, ABC COMPANY Inc. warrants that it has accepted the surface roughness of the XYZ RCC dam and the geomembrane system will not be compromised based on surface roughness. However, ABC COMPANY Inc. does not warrant the failure of the geomembrane if the XYZ RCC dam subgrade collapses, fails, or is not stable.

ABC COMPANY Inc. warrants that the water discharge through the geomembrane system drains will not exceed X gallons per minute (gpm) cumulative or X/3 gpm for one drain. This includes all water entering the geomembrane drainage system through the geomembrane, profiles, or perimeter seal. However, ABC COMPANY Inc. does not warrant the geomembrane system water from below the plinth, plinth joints, or cracks in the RCC dam that bypass the perimeter seal of the geomembrane system. Furthermore, the water discharged from the area beneath the secondary seal) is excluded from the above X gpm and X/3 gpm limits

Any claim for any alleged breach of this warranty must be made in writing, by certified mail, to the President of ABC COMPANY Inc., address phone within sixty (60) days of becoming aware of the alleged defect. Should the required notice not be given, the defect and all warranties are waived by the Purchaser, and Purchaser shall not have any rights under this warranty regarding this particular defect. ABC COMPANY Inc. shall perform Temporary Repairs or Replacements under this warranty regardless of site conditions and accessibility to alleged defects. ABC COMPANY Inc. shall not be obligated to perform Permanent Repairs or Replacements under this warranty unless and until the area to be repaired or replaced is clean, dry, and unencumbered. This includes, but is not limited to, the area made available for repair and/or replacement of PQR geomembrane to be free from all dirt, sludge, residuals and liquids of any kind. If after inspection it is determined that there is no claim under this Limited Warranty, Purchaser shall reimburse ABC COMPANY Inc. for 50% of its costs associated with the site inspection for the first two (2) unwarranted site inspections from warranty 102-2003. For subsequent unwarranted site inspections, Purchaser shall reimburse ABC COMPANY Inc. for 100% of its costs associated with site inspection. For all warranted site inspections, ABC COMPANY will not be reimbursed for its costs associated with site inspections.

In the event the exclusive remedy or installation provided herein fails in its essential purpose, and in that event only, the Purchaser shall be entitled to a return of the purchase price for so much of the material and/or installation as mutually agreed to have violated the warranty provided herein. ABC COMPANY Inc. shall not be liable for direct, indirect, special, consequential or incidental damages resulting from a breach of this warranty. ABC COMPANY Inc. shall not be obligated to reimburse Purchaser for any repairs, replacement, modifications or alterations made by Purchaser unless ABC COMPANY Inc. specifically authorized, in writing, said repairs, replacements, modifications or alteration in advance of them having been made. ABC COMPANY Inc.'s liability under this warranty shall in no event exceed the replacement cost of the material and/or installation sold to the Purchaser for the particular installation in which it failed.

ABC COMPANY Inc. neither assumes nor authorizes any person other than the undersigned of ABC COMPANY Inc. to assume for it any other or additional liability in connection with the XYZ geomembrane system made on the basis of the Limited Warranty. The Limited Warranty on the XYZ geomembrane system herein is given in lieu of all other possible installation warranties, either expressed or implied, and by accepting the geomembrane system, Purchaser waives all other possible warranties, except those specifically given.

Limited Warranty is extended to the purchaser/owner and is transferable and assignable; to successors of the Purchaser.

Purchaser acknowledges by acceptance that the Limited Warranty given herein is accepted in preference to any and other possible materials warranties.

ABC COMPANY INC. MAKES NO WARRANTY OF ANY KIND OTHER THAN THAT GIVEN ABOVE AND HEREBY DISCLAIMS ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. THIS IS THE ONLY WARRANTY THAT APPLIES TO THE MATERIALS AND INSTALLATION REFERRED TO HEREIN AND ABC COMPANY INC. DISCLAIMS ANY LIABILITY FOR ANY WARRANTIES GIVEN BY ANY OTHER PERSON OR ENTITY, EITHER WRITTEN OR ORAL.
ABC COMPANY INC.'S WARRANTY BECOMES AN OBLIGATION OF ABC COMPANY INC.
TO PERFORM UNDER THE WARRANTY ONLY UPON RECEIPT OF FINAL PAYMENT.

I hereby state that I have read and understand the above and foregoing Limited Warranty and agree to such by signing hereunder. DATE: _____
PURCHASER NAME: _____ ABC COMPANY INC.: _____

SIGNATURE: _____ *President or Authorized Representative*

TITLE: _____ Sworn before me this _____ day of _____ 200 _____

**TECHNICAL SOLUTIONS/GEOMEMBRANES ADOPTED
IN THE CITED EXAMPLES**

***SOLUTION TECHNIQUES/GÉOMEMBRANES UTILISÉES DANS LES
EXEMPLES CITÉS:***

Figures 4.6.2a: Sibelon CNT 2150 and Sibelon C 1950 for Carpi
Figures 4.6.2a: Sibelon CNT 2150 et Sibelon C 1950 pour Carpi

Figures 4.6.3: Sibelon CNT 4600 for Carpi
Figures 4.6.3: Sibelon CNT 4600 pour Carpi

Figures 4.6.5, 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3, 5.6.5, 6.6.1, 6.6.2, 7.6.1, 7.6.2, 7.6.3, 7.6.4, 7.6.5:
Sibelon CNT 3750 and Sibelon C 3250 for Carpi

*Figures 4.6.5, 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3, 5.6.5, 6.6.1, 6.6.2, 7.6.1, 7.6.2, 7.6.3, 7.6.4, 7.6.5:
Sibelon CNT 3750 et Sibelon C 3250 pour Carpi*

Figures 4.6.2b and 6.6.2 : Sibelon CNT 4400 for Carpi
Figures 4.6.2b et 6.6.2 : Sibelon CNT 4400 pour Carpi

Figures 6.6.3: Sibelon CNT 2800 for Carpi
Figures 6.6.3: Sibelon CNT 2800 pour Carpi

Patents cited

Brevets mentionnés:

Carpi/Sibelon: 4.3.6.2, 4.5.1, 4.6.2, 5.5.2, 5.4.6.1, 5.4.7, 6.2, 6.2.1, 6.4.6, 7.3.1 & Figures
63, 4.6.5, 81, 83, 84, 85, 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3, 5.6.5, 111, 118, 119, 6.6.1, 6.6.2, 6.6.3, 132,
7.6.1, 7.6.2, 7.6.3, 7.6.4, 7.6.5.

Winchester: 6.2.3, 6.5.2 & Figures 6.9, 6.6.3.



Recommended Descriptions of Geosynthetics Functions, Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols

Foreword

This is the fourth edition of the IGS mathematical and graphical symbols document. Since publication of the third edition in February 1996 a number of evolutionary changes (rather than revolutionary changes) have been made to reflect the further development and refinement of geosynthetics terminology. This edition will also be placed on the IGS Web Site to provide IGS members with ready access to current geosynthetics descriptions, terminology and mathematical and graphical symbols.

IGS Secretariat
226 Sitton Road
Easley
South Carolina 29642
U.S.A.
Tel: +1-864-855 0504
Fax: +1-864-859 1698
E-mail: igssec@aol.com

August 2000



Contents	Page
1. Geosynthetics Functions	214
2. Geosynthetics Terminology	215
3. Mathematical Symbols	217
3.1. General symbols	217
3.1.1. Dimensions	217
3.1.2. Units	217
3.1.3. Prefixes for units.....	217
3.1.4. Recommended subscripts.....	218
3.1.5. Geometry and kinetics.....	219
3.2. Properties related to geosynthetic.....	219
3.2.1. Physical properties	219
3.2.2. Hydraulic properties	219
3.2.3. Mechanical properties	220
3.2.4. Interface properties.....	222
3.3. Properties related to fluids.....	222
3.3.1. Physical properties	222
3.3.2. Flow properties.....	222
3.4. Properties related to geotechnics.	222
3.4.1. Physical properties	222
3.4.1.1. Solid particles and their distribution.....	222
3.4.1.2. Density of soils	223
3.4.1.3. Voids and water in soils.....	223
3.4.1.4. Consistency of soils	223
3.4.2. Stresses in soils	224
3.4.3. Hydraulic properties	224
3.4.4. Mechanical properties	224
3.4.4.1. Soil behaviour under compressive strains	224
3.4.4.2. Soil behaviour under shear strains	225
3.5. Properties related to geotechnical structures	226
3.5.1. Structure dimensions	226
3.5.2. External applied loads.....	226
3.5.3. Earth pressures.....	226
3.6. Factors of safety, partial factors and reduction factors	227
4. Graphical Symbols	227
4.1. Products	227
4.2. Functions	228
4.3. Multiple products on same diagram.....	228



1. Geosynthetics Functions

Barrier: The use of a geosynthetic material to prevent the migration of liquids or gases.

Containment: The use of a geosynthetic material to contain soil or sediments to a specific geometry and prevent its loss. The contained fill takes the shape of the inflated at-rest geometry of the geosynthetic container.

Drainage (a.k.a. transmission): The use of a geosynthetic material to collect and transport fluids.

Filtration: The use of a geosynthetic material to allow passage of fluids from a soil while preventing the uncontrolled passage of soil particles.

Protection: The use of a geosynthetic material as a localised stress reduction layer to prevent or reduce damage to a given surface or layer.

Reinforcement: The use of the tensile properties of a geosynthetic material to resist stresses or contain deformations in geotechnical structures.

Separation: The use of a geosynthetic material between two dissimilar geotechnical materials to prevent intermixing.

Surficial erosion control: The use of a geosynthetic material to prevent the surface erosion of soil particles due to surface water run-off and/or wind forces.



2. Geosynthetics Terminology

Bituminous geomembrane: see Geomembrane, bituminous.

Bonded geogrid: see Geogrid, bonded.

Drainage composite: see Geocomposite drain.

Elastomeric geomembrane: see Geomembrane, elastomeric.

Electrokinetic geosynthetic: A composite material which may provide filtration, drainage, reinforcement in addition to electrical conduction.

Extruded geogrid: see Geogrid, extruded.

Geoarmour: A permeable geosynthetic material placed over the surface of the soil, in conjunction with pattern-placed block armour units, to prevent erosion.

Geobar: A polymeric material in the form of a bar, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.

Geoblanket: A permeable, biodegradable (synthetic or natural) structure placed over the soil for temporary erosion control applications, usually while vegetation is being established.

Geocell: A three-dimensional, permeable, polymeric (synthetic or natural) honeycomb or web structure, made of strips of geotextiles, geogrids or geomembranes linked alternately and used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.

Geocomposite: A manufactured or assembled material using at least one geosynthetic product among the components, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.

Geocomposite clay liner: An assembled structure of geosynthetic materials and low hydraulic conductivity earth materials (clay or bentonite), in the form of a manufactured sheet, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.

Geocomposite drain: A prefabricated subsurface drainage product which consists of a geotextile filter skin supported by a geonet or a geospacer.

Geocomposite reinforcement: An assembled structure of dissimilar geosynthetic materials used for soil reinforcement.

Geofoam: A polymeric material which has been formed by the application of the polymer in semi-liquid form, through the use of a foaming agent, and results in a lightweight material with high void content, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.

Geoform: A three-dimensional, permeable geosynthetic structure, filled with soil or sediment waste such that the fill takes the shape of the inflated geoform.

Geogrid: A planar, polymeric structure consisting of a regular open network of integrally connected tensile elements, which may be linked by extrusion, bonding or interlacing, whose openings are larger than the constituents, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.

Geogrid, bonded: A geogrid manufactured by bonding, usually at right angles, two or more sets of strands or elements.

Geogrid, extruded: A geogrid manufactured by extruding polymers and drawing in a sheet form.

Geogrid, knitted: A geogrid manufactured by knitting together yarns or elements, usually at right angles to each other.



-
- Geogrid, woven:** A geogrid manufactured by weaving yarns or elements, usually at right angles to each other.
- Geomat:** A three-dimensional, permeable, polymeric structure, made of bonded filaments, used to reinforce roots of grass and small plants and extend the erosion-control limits of vegetation for permanent erosion control applications.
- Geomattress:** A three-dimensional, permeable geosynthetic structure, placed over the surface of a soil, and then filled with concrete mortar or soil, to prevent erosion.
- Geomembrane:** A planar, relatively impermeable, polymeric (synthetic or natural) sheet used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.
- Geomembrane, bituminous:** A planar, relatively impermeable sheet manufactured from natural bituminous materials.
- Geomembrane, elastomeric:** A planar, relatively impermeable sheet manufactured from elastomeric polymers.
- Geomembrane, plastomeric:** A planar, relatively impermeable sheet manufactured from plastomeric polymers.
- Geonet:** A planar, polymeric structure consisting of a regular dense network, whose constituent elements are linked by knots or extrusions and whose openings are much larger than the constituents, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.
- Geospacer:** A three-dimensional polymeric structure with large void spaces, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.
- Geostrip:** A polymeric material in the form of a strip, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.
- Geosynthetic:** A planar, polymeric (synthetic or natural) material used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.
- Geotextile:** A planar, permeable, polymeric (synthetic or natural) textile material, which may be nonwoven, knitted or woven, used in contact with soil/rock and/or any other geotechnical material in civil engineering applications.
- Geotextile, knitted:** A geotextile produced by interlooping one or more yarns, fibres, filaments or other elements.
- Geotextile, nonwoven:** A geotextile in the form of a manufactured sheet, web or batt of directionally or randomly orientated fibres, filaments or other elements, mechanically and/or thermally and/or chemically bonded.
- Geotextile, woven:** A geotextile produced by interlacing, usually at right angles, two or more sets of yarns, fibres, filaments, tapes or other elements.
- Knitted geogrid:** see Geogrid, knitted.
- Knitted geotextile:** see Geotextile, knitted.
- Nonwoven geotextile:** see Geotextile, nonwoven.
- Plastomeric geomembrane:** see Geomembrane, plastomeric.
- Woven geogrid:** see Geogrid, woven.
- Woven geotextile:** see Geotextile, woven.
-

3. Mathematical Symbols

3.1. General symbols

3.1.1. Dimensions

Symbols used for dimensions are:

L	length
M	mass
t	time
T	temperature
–	dimensionless

3.1.2. Units

m	metre
m ²	square metre
m ³	cubic metre
km	kilometre = 10 ³ m
mm	millimetre = 10 ⁻³ m
µm	micrometre or micron = 10 ⁻⁶ m
g	gram
mg	milligram = 10 ⁻³ g
kg	kilogram = 10 ³ g
Mg	megagram = 10 ⁶ g = tonne
s	second
N	newton
kN	kilonewton = 10 ³ N
Pa	pascal = N/m ²
kPa	kilopascal = kN/m ²
MPa	megapascal = MN/m ²
j	joule = Nm
tex	tex = 10 ⁻⁶ kg/m = mg/m
j/kg	tenacity = 10 ⁻⁶ N/tex
°	degree
%	percent
–	pure number

3.1.3 Prefixes for units

G	giga = 10 ⁹
M	mega = 10 ⁶
k	kilo = 10 ³
c	centi = 10 ⁻²
m	milli = 10 ⁻³
µ	micro = 10 ⁻⁶
n	nano = 10 ⁻⁹

3.1.4. Recommended subscripts

a	air, active (earth pressure), allowed
B	base
cr	creep reduction
cv	constant volume or critical state
d	dry state, diameter, design
f	failure, fibre, filament, final
GSY	geosynthetic material, e.g. t_{GSY} is thickness of geosynthetic material
GBA	geobar
GBL	geoblanket
GCE	geocell
GCD	geocomposite drain
GCL	geocomposite clay liner
GEC	geosynthetic erosion control material
GEK	electrokinetic geosynthetic
GFO	geofoam
GFR	geoform
GGR	geogrid
GMA	geomat
GMB	geomembrane
GMT	geomattress
GNT	geonet
GSP	geospacer
GST	geostrip
GTX	geotextile
GTXw	woven geotextile
GTXnw	nonwoven geotextile
h	horizontal
i	immediate, initial
j	joint
k	characteristic, e.g. $T_{max,k}$ is characteristic maximum tensile strength
m	material
max	maximum
min	minimum
mr	material reduction
n	normal, number
p	passive (earth pressure), planar, pullout
r	radial, resistance
req	required
s	solid particles, sliding
sat	saturated

sec	secant
u	undrained conditions
v	vertical
w	water
x, y	two orthogonal horizontal axes
z	vertical axis
ε	at specific strain or elongation
0	at rest (earth pressure), zero
1,2,3	principal directions

3.1.5. Geometry and kinetics

A	L^2	(m^2)	area
b, B	L	(m)	breadth or width
d	L	(m)	diameter
D	L	(m)	depth
g	Lt^{-2}	(m/s^2)	acceleration due to gravity $g = 9.8 m/s^2$
H	L	(m)	height
l, L	L	(m)	length
t	t	(s)	time
v	Lt^{-1}	(m/s)	velocity
V	L^3	(m^3)	volume

3.2. Properties related to geosynthetics

3.2.1. Physical properties

t_{GTX}	L	(mm)	thickness of GTX, etc.
b_{GTX}	L	(m)	width of GTX, etc.
ρ_f	ML^{-3}	(Mg/m^3)	density of fibres or filaments (mass per unit volume)
μA	ML^{-2}	(g/m^2)	mass per unit area
d_f	L	(μm)	diameter of fibres or filaments
λ	ML	(tex)	linear density of yarns, fibres, filaments
A	–	($\%$)	percent open area for wovens or geogrids
n_{GTX}	–		porosity (ratio between volume of voids and total volume)

3.2.2. Hydraulic properties

O_n	L	($mm, \mu m$)	n percent opening size of a GTX - generic term
$O_{n,d}$	L	($mm, \mu m$)	n percent opening size as measured by a dry sieving test, OOSTIF dtAOS EOS e.g. $O_{90,d}$, $O_{95,d}$. Sometimes referred to AOS or EOS
$O_{95,d}$	L	($mm, \mu m$)	Equivalent Opening Size (EOS) corresponding to the 95 % opening size measured by a dry sieving test

$O_{n,w}$	L	(mm, μm)	n percent opening size as measured by a wet sieving test, e.g. $O_{90,w}$, $O_{95,w}$. Sometimes referred to D_w or d_{95}
q_n	LT^{-1}	(litres/ $\text{m}^2\cdot\text{s}$)	flow capacity normal to the plane of a GTX - generic term
$q_{n,h}$	LT^{-1}	(litres/ $\text{m}^2\cdot\text{s}$)	flow capacity normal to the plane of a GTX under water head h (in mm), e.g. $q_{n,100}$ is flow capacity normal to the plane under water head of 100 mm
q_p	L^2T^{-1}	(litres/ $\text{m}\cdot\text{s}$)	flow capacity within the plane of a GTX, GNE or GCD – generic term. L^2T^{-1}
$q_{p,i}$	L^2T^{-1}	(litres/ $\text{m}\cdot\text{s}$)	flow capacity within the plane of a GTX, GNE or GCD under hydraulic gradient i , e.g. $q_{p,1}$ is flow capacity within the plane under hydraulic gradient of 1
k_n	Lt^{-1}	(m/s)	coefficient of permeability normal to the plane
k_p	Lt^{-1}	(m/s)	coefficient of permeability in the plane of a GTX or GCD
ψ	t^{-1}	(s^{-1})	permittivity of a GTX. $\psi = k_n/t_{\text{GTX}}$
θ	L^2t^{-1}	(m^2/s)	transmissivity of a GTX or GCD. $\theta = k_p t_{\text{GTX}}$
ψ'	t^{-1}	(s^{-1})	permittivity of a GMB to vapour flow (permeance). It is the rate of vapour transmission divided by the vapour pressure difference across the GMB
k'_n	Lt^{-1}	(m/s)	vapour permeability of a GMB normal to its plane. $k'_n = \psi' t_{\text{GMB}}$

3.2.3. Mechanical properties

ε	–	(%)	strain or elongation
ε'	t^{-1}	(%/s)	strain rate
ε_f	–	(%)	strain or elongation at failure
ε_{max}	–	(%)	maximum strain or elongation
T	Mt^{-2}	(kN/m)	tension (tensile strength per unit width)
T	Mt^{-2}	(kN/m)	tension at a given elongation ε ; e.g. T_{30} is the tension at 30 % elongation
T_f	Mt^{-2}	(kN/m)	tension at failure
T_{max}	Mt^{-2}	(kN/m)	maximum tension
T_a	Mt^{-2}	(kN/m)	allowable tension
T_B	Mt^{-2}	(kN/m)	base tension in a geosynthetic reinforcement after allowing for the effects of creep. Sometimes referred to as creep-limited strength
T_{req}	Mt^{-2}	(kN/m)	required tension

J	Mt^{-2}	(kN/m)	tensile stiffness
J_{ϵ}	Mt^{-2}	(kN/m)	tangential tensile stiffness at elongation ϵ
J_i	Mt^{-2}	(kN/m)	initial tensile stiffness (at $\epsilon = 0$ %)
$J_{sec \epsilon}$	Mt^{-2}	(kN/m)	secant tensile stiffness between the origin and elongation ϵ ; e.g. J_{sec30} is the secant tensile stiffness between elongation $\epsilon = 0$ and $\epsilon = 30\%$
$J_{secn,m}$	Mt^{-2}	(kN/m)	secant tensile stiffness between $\epsilon = n\%$ and $\epsilon = m\%$ elongation
σ_{ϵ}	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	tensile stress at elongation ϵ ; e.g. σ_{30} is the tensile stress at 30% elongation
σ_{max}	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	maximum tensile stress
σ_f	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	tensile stress at failure
E	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	elastic modulus
E_i	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	initial tangential modulus (see J_i)
E_{ϵ}	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	tangential modulus at elongation ϵ (see $J_{sec \epsilon}$)
$E_{sec \epsilon}$	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	secant modulus between the origin and elongation ϵ (see $J_{sec \epsilon}$)
ν	–		poisson's ratio
ξ_y	L^2t^2	(N/tex)	tenacity of a yarn (ratio between tensile strength of a yarn and its linear density)
ξ		(varies)	mechanical efficiency (ratio between maximum strength and mass per unit area)
F_f	MLt^{-2}	(N, kN)	load recorded at failure in a tensile test (NB: the tensile test must be specified)
F_{max}	MLt^{-2}	(N, kN)	maximum tensile force of a GT or GM (NB: the tensile test must be specified)
F_G	MLt^{-2}	(N, kN)	breaking force as measured in a Grab test (NB: the Grab test must be specified)
F_P	MLt^{-2}	(N, kN)	breaking force in a static puncture test (NB: the static puncture test must be specified)
F_T	MLt^{-2}	(N, kN)	breaking force in a tear propagation test (NB: the tear propagation test must be specified)
Odc	L	(mm)	perforation resistance in a dynamic tear initiation test (NB: the tear initiation test must be specified)
P_r	Mt^{-2}	(kN/m)	pullout resistance
p_B	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	bursting pressure (NB: the burst test must be specified)
W_I	ML^2t^{-2}	(Joules)	energy measuring the resistance in an impact test (NB: the impact test must be specified)

3.2.4. Interface properties

$f_{s/GSY}$	-	(-)	friction interaction coefficient between soil and GSY. $f_{s/GSY} \tan \phi' = \tan \phi'_{s/GSY}$. ϕ' is friction angle of soil
$\mu_{s/GSY}$	-	(-)	coefficient of friction between soil and GSY. $\mu_{s/GSY} = \tan \phi'_{s/GSY}$ and $\mu_{s/GSY} = f_{s/GSY} \tan \phi'$
$\phi'_{s/GSY}$	-	(°)	effective friction angle between soil and GSY - general term
$\phi'_{p, s/GSY}$	-	(°)	effective peak friction angle between soil and GSY
$\phi'_{cv, s/GSY}$	-	(°)	effective large strain friction angle between soil and GSY

3.3. Properties related to fluids

3.3.1. Physical properties

ρ_w	ML^{-3}	(Mg/m ³)	density of water (mass per unit volume)
γ_w	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	unit weight of water (weight per unit volume)
η_w	ML^{-1}	(kg/ms)	dynamic viscosity of water

3.3.2. Flow properties

h	L	(m)	hydraulic head or potential
Q	$L^3 t^{-1}$	(m ³ /s)	rate of discharge (also called flow rate) – volume of water passing through a given area per unit of time
v	Lt^{-1}	(m/s)	discharge velocity
i	-		hydraulic gradient
j	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	seepage force per unit volume (force per unit volume of a porous medium generated by action of fluid upon the solid elements of the porous medium). $j = i \gamma_w$

3.4. Properties related to geotechnics

3.4.1. Physical properties

3.4.1.1. Solid particles and their distribution

ρ_s	ML^{-3}	(Mg/m ³)	density of solid particles (ratio between mass and volume of solid particles)
γ_s	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	unit weight of solid particles (weight of solid particles per unit volume). $\gamma_s = \rho_s g$
d	L	(μ m, mm)	particle diameter
d_n	L	(μ m, mm)	n percent diameter (diameter corresponding to $n\%$ by weight of finer particles)
C_u	-		uniformity coefficient. $C_u = d_{60}/d_{10}$

3.4.1.2. Density of soils

ρ	ML^{-3}	(Mg/m ³)	density of soil (ratio between total mass and total volume of soil)
γ	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	unit weight of soil (ratio between total weight and total volume of soil). $\gamma = \rho g$
ρ_d	ML^{-3}	(Mg/m ³)	density of dry soil (ratio between mass of solid particles and total volume of soil)
γ_d	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	unit weight of dry soil (ratio between weight of solid particles and volume of soil). $\gamma_d = \rho_d g$
ρ_{sat}	ML^{-3}	(Mg/m ³)	density of saturated soil (ratio between total mass and total volume of completely saturated soil)
γ_{sat}	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	unit weight of saturated soil (ratio between total weight and total volume of completely saturated soil). $\gamma_{sat} = \rho_{sat} g$
ρ'	ML^{-3}	(Mg/m ³)	density of submerged soil (difference between density of soil and density of water). $\rho' = \rho - \rho_w$
γ'	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	unit weight of submerged soil (difference between unit weight of soil and unit weight of water) $\gamma' = \gamma - \gamma_w = \rho' g$

3.4.1.3. Voids and water in soils

e	-	(-)	void ratio (ratio between volume of voids and volume of solid particles)
n	-	(%)	porosity (ratio between volume of voids and total volume of soil)
w	-	(%)	water content (ratio between weight of pore water and weight of solid particles)
S_r	-	(%)	degree of saturation (ratio between volume of pore water and volume of voids)

3.4.1.4. Consistency of soils

w_L	-	(%)	liquid limit (water content of a remoulded soil at transition between liquid and plastic states, determined by a standard laboratory test)
w_P	-	(%)	plastic limit (water content of a remoulded soil at transition between plastic and semi-solid states, determined by a standard laboratory test)
w_S	-	(%)	shrinkage limit (maximum water content at which a reduction of water content will not cause a decrease in volume of the soil mass)

I_P	-	(%)	plasticity index (difference between liquid and plasticity limits)
I_L	-	(%)	liquidity limit, defined as $(w - w_P)/I_P$
I_C	-	(%)	consistency index, defined as $(w_L - w)/I_P$
e_{max}	-	(-)	void ratio in loosest state (maximum void ratio obtainable by a standard laboratory procedure)
e_{min}	-	(-)	void ratio in densest state (minimum void ratio obtainable by a standard laboratory procedure)
I_D	-	(-)	density index (also called 'relative density', R_D). $I_D = (e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min})$

3.4.2. Stresses in soils

σ	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	normal stress
σ'	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	normal effective stress. $\sigma' = \sigma - u$
σ'_v	ML^{-1}	(kN/m ² , kPa)	normal effective stress acting in a vertical direction
σ'_h	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	normal effective stress acting in a horizontal direction
u	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	pore water pressure
τ	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	shear stress
τ	-	(%)	strain

3.4.3. Hydraulic properties

k	Lt^{-1}	(m/s)	coefficient of permeability (or hydraulic conductivity)
i	-	(-)	hydraulic gradient

3.4.4. Mechanical properties

3.4.4.1 Soil behaviour under compressive strains

C_c	-	(-)	compression index (slope of virgin compression curve in a semi-logarithmic plot)
C_r	-	(-)	recompression index (slope of recompression curve in a semi-logarithmic plot)
C_α	-	(-)	secondary compression index (slope of secondary compression curve in a semi-logarithmic plot)
C_h	L^2t^{-1}	(m ² /s)	vertical coefficient of consolidation (due to pore water movement in horizontal direction)

C_v	L^2t^{-1}	(m ² /s)	vertical coefficient of consolidation (due to pore water movement in vertical direction)
m_v	$M^{-1}Lt^2$	(m ² /MN)	coefficient of volume change (in vertical direction)
σ'_p	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	pre-consolidation pressure (the greatest effective overburden pressure the soil mass has carried in the past)
E	$ML^{-1}t^{-2}$	(MN/m ² , MPa)	deformation modulus (ratio between a given normal stress change and the strain change in the same direction, all other stresses being constant)
K'	$ML^{-1}t^{-2}$	(MN/m ² , MPa)	elastic bulk modulus. $K' = E/(3 - 6\nu)$
k_s	$ML^{-2}t^{-2}$	(kN/m ³)	modulus of subgrade reaction (ratio between change of vertical stress on a rigid plate placed on the soil, and the corresponding change of vertical settlement of the plate)
T_v	–	(–)	time factor, $T_v = t c_v/d^2$, where t is time and d is the length of the drainage path
ν	–	(–)	poisson's ratio (ratio between strain changes perpendicular to and in the direction of a given uniaxial stress change)

3.4.4.2. Soil behaviour under shear strains

τ	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	shear strength. $\tau = c + \tan \phi$
τ_u	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	shear strength measured under undrained (total stress) conditions. $\tau_u = c_u + \tan \phi_u$
τ_d	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	shear strength measured under drained conditions. $\tau_d = c_d + \tan \phi_d$
τ'	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	shear strength measured under effective stress conditions. $\tau' = c' + \tan \phi'$
τ'_{cv}	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	residual shear strength measured under effective stress conditions. $\tau'_{cv} = c'_{cv} + \tan \phi'_{cv}$
c	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	cohesion
c_u	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	cohesion measured under undrained conditions
c_d	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	cohesion measured under drained conditions
c'	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	cohesion measured under effective stress conditions
c'_{cv}	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	residual cohesion measured under effective stress conditions

G'	$ML^{-1}t^{-2}$	(MN/m ² , MPa)	elastic shear modulus. $G' = E/(2+2\nu)$
ϕ	–	(°)	soil friction angle
ϕ_u	–	(°)	soil friction angle measured under undrained conditions
ϕ_d	–	(°)	soil friction angle measured under drained conditions
ϕ'	–	(°)	soil friction angle measured under effective stress conditions
ϕ'_{cv}	–	(°)	residual soil friction angle measured under effective stress conditions, also termed the critical state friction angle
γ	–	(°)	soil dilation angle
γ'	–	(°)	soil dilation angle under effective stress conditions
μ	–	(–)	coefficient of friction of soil. $\mu = \tan \phi'$

3.5. Properties related to geotechnical structures

3.5.1. Structure dimensions

b, B	L	(m)	breadth of foundation, slope or embankment
D	L	(m)	depth of foundation, depth below toe of slope
h, H	L	(m)	vertical height of wall, slope or embankment
l, L	L	(m)	length of foundation or embankment
s	L	(m)	settlement
U	–	(%)	degree of consolidation
β	–	(°)	angle of slope to horizontal

3.5.2. External applied loads

F_h	MLt^{-2} or Mt^{-2}	(kN or kN/m)	external applied concentrated horizontal force
F_v	MLt^{-2} or Mt^{-2}	(kN or kN/m)	external applied concentrated vertical force
w_s	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	external applied surcharge load

3.5.3. Earth pressures

K	–	(–)	ratio of horizontal to vertical stress
K_a	–	(–)	active earth pressure coefficient
K_o	–	(–)	at-rest earth pressure coefficient
K_p	–	(–)	passive earth pressure coefficient








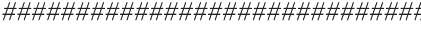
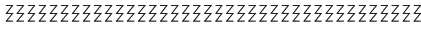
α	$ML^{-1}t^{-2}$	(kN/m ² , kPa)	wall adhesion (adhesion between wall and adjacent soil)
δ_u	–	(°)	angle of wall friction (angle of friction between wall and adjacent soil)

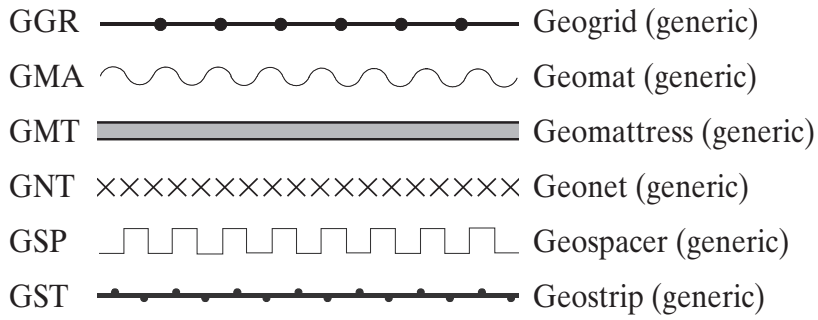
3.6. Factors of safety, partial factors and reduction factors

FS	–	(–)	global factor of safety (normally derived from limit equilibrium methods)
f_{cr}	–	(–)	reduction factor associated with the loss in load carrying capability due to creep effects of a reinforcement over time
f_f	–	(–)	partial factor associated with dead loads in a structure
f_q	–	(–)	partial factor associated with live loads in a structure
f_m	–	(–)	partial factor associated with the strength of the materials used in the structure
f_{mr}	–	(–)	reduction factor associated with the loss in load carrying capability due to installation and durability effects of a reinforcement over time
f_n	–	(–)	partial factor associated with the economic ramifications of structural failure
f_p	–	(–)	partial factor associated with the pull-out resistance of geosynthetic reinforcements
f_s	–	(–)	partial factor associated with the sliding resistance of geosynthetic reinforcements

4. Graphical Symbols

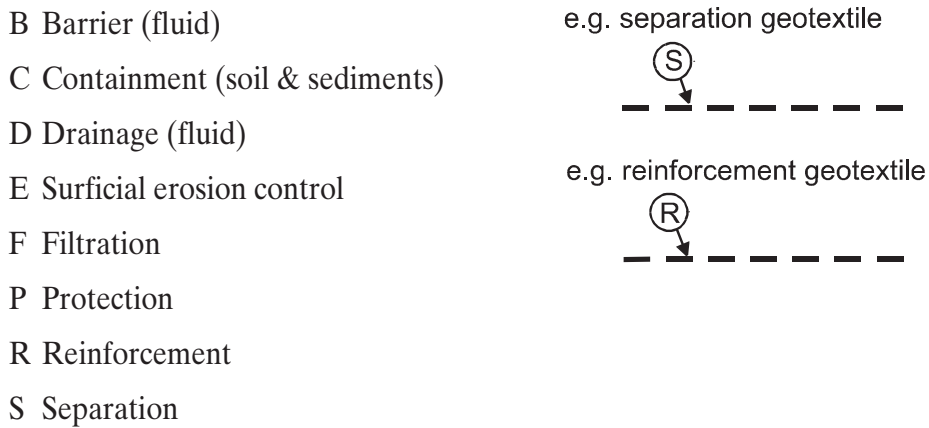
4.1. Products

GTX		Geotextile (generic)
GMB		Geomembrane (generic)
GBA		Geobar (generic)
GBL		Geoblanket (generic)
GCD		Geocomposite drain (generic) - with geotextile on both sides
GCE		Geocell (generic)
GCL		Geocomposite clay liner (generic)
GEC		Surficial geosynthetic erosion control (generic)
GEK		Electrokinetic geosynthetic (generic)



4.2. Functions

The following function symbols may be used where it is considered that a description of the role of the geosynthetic material may provide further clarity to the drawing or diagram.



4.3. Multiple products on same diagram



New bulletin

GEOMEMBRANES AS FACING MATERIALS

Bibliography

1. ICOLD PUBLICATION

1.1. RESUME OF ICOLD PUBLICATION

- Bulletin N° 107, Concrete dams. Control and treatment of cracks - 1997
- Bulletin N° 78, Watertight géomembranes for dams - 1991
- Bulletin N° 55 Geotextiles as filters and transitions in fill dams - 1986
- Bulletin N° 38, Use of thin membranes on fill dams - 1981
- Proceeding 21st Congress, Montreal 2003 Q 80 R 8, Q 82 - R: 41, 45, 62, Com. pp and general report
- Proceeding 20th Congress, Beijing 2000 Q 78 R 74, Com. pp 787-805 report 1 volume IV
- Proceeding 18th Congress, Durban 1994 Q 68 - R 87, Q 70 - R 26
- Proceeding 17th Congress, Vienna 1991 Q 65 - R 42
- Proceeding 16th Congress, San Francisco 1988 Q 61 - R: 8, 15, 23, 24, 26, 31, 45, 53, 61, General report
- Proceeding 14th Congress, Rio-de-Janeiro 1982 Q 55, General report
- Proceeding 11th Congress, Madrid 1973 Q 42 - R: 22, 27, 28, 48, General report
- Proceeding 7th Congress, Rome 1961 Q 27 - R 97

1.2. DETAILS OF SOME ICOLD CONGRESS REPORTS

- O. Liberal, A. Silva Matos, D. Camelo, A. Soares de Pinho, A. Tavares de Castro, J. Machado Vale : *Ageing process and rehabilitation of Pracana dam*
MONTREAL Congress 21, 2003, report 8, Volume II
- P. Schäfer, S. Perzmaier, M. Conrad, T. Strobl, M. Aufleger : *Rehabilitation of dam facings monitored by an advanced technology for leakage detection*
MONTREAL Congress 21, 2003, report 9, Volume II
- D. C. Harlan, S. C. Onken : *Mitigation of damage and rehabilitation of aging concrete dams subject to freeze-thaw deterioration*
MONTREAL Congress 21, 2003, report 30, Volume II
- A. M. Scuero, G. L. Vaschetti : *Can uplift be controlled*
MONTREAL Congress 21, 2003, report 42, Volume II
- A. M. Scuero, G. L. Vaschetti : *Rehabilitating dams without dewatering the reservoir*
MONTREAL Congress 21, 2003, report 86, Volume II
- A. M. Scuero, G. L. Vaschetti : *Stopping leakage: performance of drained synthetic liners over 40 years*
MONTREAL Congress 21, 2003, report 87, Volume II

- J. L. Gautier : *Quelques exemples d'étanchéification de masques amont par une membrane bitumineuse de 1980 à nos jours.*
MONTREAL Congress 21, 2003, Q 82 - Com. pp
- P. Agresti, A. Yziquel, M. Hoonakker, M. Salembier, R. Tourment : *Rehabilitation of old gravity dams with geomembranes - Réhabilitation de barrages-poids anciens par géomembranes*
MONTREAL Congress 21, 2003, Q 82 - R 45
- P. Royet, C. Noret-Duchène, C. Brunet, D. Cochet, M. Lino : *Synthesis on ageing and rehabilitation of French masonry dams. - Synthèse sur le vieillissement et la réhabilitation des barrages français en maçonnerie*
MONTREAL Congress 21, 2003, Q 82 - R 41
- J. Claydon, I. Stevens, I. Carter, G. Wilson : *Winscar : Dam membrane repairs: Financial arrangements and risk management - Réparations à la membrane du barrage de Winscar : arrangements et gestion des risques financiers.*
MONTREAL Congress 21, 2003, Q 80 - R 8
- J. C. De Cea Azanedo, E. Asanza, M. Blanco : *Face protection: Geomembranes lining vs. paint coating - Réhabilitation de parements avec géomembranes ou avec traitements superficiels.*
MONTREAL Congress 21, 2003, Q 82 - R 62
- Carter, I. Claydon, J. R. Robertshaw, A. C. Winscar dam - *24 years of manual seepage measurement replaced by automation*
BEIJING Congress 20, 2000, Q 78, pp. 1211-1220, report 74, volume III
- Fernandez Oliva, A. Salvi, G. J. *The use of a slurry cut off wall with HDPE geomembrane to confine the water from the consolidation process of the tailings*
BEIJING Congress 20, 2000, Com., pp. 787-805, report 1, volume IV
- Baccini, S., Visentini, G., Brutti, C., *Damage to the impervious lining of Castreccioni reservoir and subsequent remedial measures*
FLORENCE Congress 19, 1997, Q 75, pp. 643-653, report 46, volume IV
- Baldovin G., Fiamberti A., Baldovin E. *Rehabilitation and waterproofing of the upstream facing of Ceresole Reale dam*
DURBAN Congress 18, 1994, Q 68, pp. 1465-1484, report 87, volume I
- Lazzarini P., Bourdarot E., Bonnet P., Frossard E., Lurin P. *Problèmes spécifiques aux surélévations de barrages en béton ou en maçonnerie*
DURBAN Congress 18, 1994, Q 70, pp. 395-421, report 26, volume III
- F. Monari, A. M. Scuero : *Ageing of concrete dams : the use of geocomposites for repair and future protection*
VIENNA Congress 17, 1991, Q 65, pp. 769-783, report 42, volume II
- Flögl, H., Staüble, H. : *Experience with the supplementary installation of an elastic diaphragm in the rock of Schlegeis arch dam*
VIENNA Congress 17, 1991, Q 66, pp. 731-742, report 41, volume III
- Alsina Perez E., Amigo Rodriguez E., Aguiar González E., Fernandez Bethencourt J. : *Plan of reservoirs (Plan de balsas) of Tenerife : a case of intensive application of geomembranes*
SAN FRANCISCO Congress 16, 1988, Q 61, pp. 1151-1175, report 61, volume II
- Forrest M. P., Smith E. S., Kmetz J. H., Buranek D. : *Stillwater impoundment geomembrane liner : engineering and construction*
SAN FRANCISCO Congress 16, 1988, Q 61, pp. 571-597, report 31, volume II

- Sembenelli P., Cuniberti J. S. : *Engineering geomembrane linings*
SAN FRANCISCO Congress 16, 1988, Q 61, pp. 455-463, report 24, volume II
- Timblim Jr. L. O., Grey P. G., Morrison W. R. : *Emergency spillways using geomembranes*
SAN FRANCISCO Congress 16, 1988, Q 61, pp. 525-537, report 28, volume II
- Baccini S., Visentini G., Baldovin G., Ghirardini A. : *Impervious lining for Castreccioni reservoir on the Musone river*
LAUSANNE Congress 15, 1985, Q 58, pp. 1349-1357, report 79, volume III
- Ch. Bianchi, C. Rocca-Serra, J. Girollet : *Utilisation d'un revêtement mince pour l'étanchéité d'un barrage de plus de 20m de hauteur*
NEW DELHI Congress 13, 1979, pp. 173-187, report C 11, volume IV

2. INTERNATIONAL CONFERENCES AND SYMPOSIA

2.1. LIST OF NATIONAL OR INTERNATIONAL CONFERENCES AND SYMPOSIA ABOUT GEOMEMBRANE

- 5^e Rencontres Geosynthétiques 03/04 à Colmar (25-26 novembre 2003), Lille (10-11 février 2004) et Avignon (30-31 mars 2004)
- EUROGEO 3 - Third European Geosynthetics Conference, Munich – march 1st to 3th 2004
- 7th ICG - NICE 22 au 27 septembre 2002
- Colloque Technique Comité Français des Grands Barrages (CFGB) et le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) consacré aux géotextiles et géomembranes dans les barrages (Saint-Étienne 18 et 19 juin 2002)
- EUROGEO 2 - Second European Geosynthetics Conference, Bologna - October 15-18, 2000
- Rencontres Geosynthétiques 99 les 12 et 13 octobre 1999 à Bordeaux organisées par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG)
- Colloque Européen des Grands Barrages - Barcelone 18 et 19 juin 1998
- Rencontres Geosynthétiques 97 les 8 et 9 octobre 1997 à Reims organisées par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG)
- EUROGEO 1 - First European Geosynthetics Conference, Maastrich septembre 30 - October 2, 1996 “Geosynthetics : Applications, Design and Construction” Proceeding
- Colloque Technique Comité Français des Grands Barrages (CFGB) et le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) consacré aux géotextiles et géomembranes dans les barrages (Paris le 11/6/96)
- Colloque Européen des Grands Barrages - Stockholm 5-7 juin 1996
- Rencontres Geosynthétiques 95 les 27 et 28/9/95 à Beaune organisées par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG)
- Rencontres Geosynthétiques 93 les 29 et 30/9/93 à Joué-les-Tours organisées par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG)

2.2. SPECIFIC PROCEEDING FROM INTERNATIONAL CONFERENCES AND SYMPOSIA

2.2.1. Seventh International Conference on Geosynthetics - Nice 2002

- J. L. Gautier, M. Lino, D. Carlier : *A record height in dam waterproofing with bituminous geomembrane : La Galaube dam on Alzeau river*
- A. Leiro, M. Blanco & G. Zaragoza : *Performance of synthetic geomembranes used in waterproofing of Spanish reservoirs*
- I. Scherrer, B. Otto & R. Baumann : *Application of a fully bonding synthetic membrane by the refurbishment of the Lago Bianco Dams*
- A. M. Scuro & G. L. Vaschetti : *Repair at Winscar bituminous concrete facing rockfill dam*
- T. K. Tao, J. Yan, R.-N. Tang & M. X. Yang : *Application of geotextile/geomembrane composite in the core wall of a rock fill dam*
- H. Girard, D. Poulain, J.-P. Benneton & D. Fayou : *Durability of PVC-P geomembranes used in hydraulic structures : feedback on experience*
- K. E. Jiang & M. Liu : *Applications of geomembrane in masonry structures.*
- J. Takimoto, Y. Kaneko, M. Kashiwayangi & F. Tatsuoka : *Performance of synthetic rubber sheets for surface lining of the upper pond in Yambaru seawater pumped storage power plant*
- J. P. Benneton, Y. Gerard : *Mechanical strenght evaluation of geomembrane welds - Weldiong factors*
- Briançon L. : *Friction at geosynthetic interfaces under hydraulic conditions: new inclined plane test procedures and applications*

2.2.2. Colloque Technique Comité Français des Grands Barrages (CFGB) et le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) consacré aux géotextiles et géomembranes dans les barrages (Saint-Étienne 18 et 19 juin 2002)

- François Caquel et Philippe Delmas : *Normalisation européenne et marquage CE*
- Robert Biguet : *La certification ASQUAL des géosynthétiques*
- Jean-Paul Benneton : *Contrôles des géosynthétiques dans les barrages*
- Nathalie Touze-Foltz : *Méthodes de détection et de localisation de défauts dans les géomembranes*
- C. Tisserand, D. Poulain, P. Royet : *La durabilité des géomembranes dans les barrages en remblai*
- O. Crépon, M Lino : *Réhabilitation par géomembranes des barrages de l'Echapre et du Rouchain*
- P. Agresti et A. Yziquel : *Barrage de la Rive : confortement par géomembrane d'un barrage ancien*

2.2.3. EUROGEO2 - Second European Geosynthetics Conference, Bologna - October 15-18, 2000 “Geosynthetics : Applications, Design and Construction” Proceeding

- Briançon L., Girard H., Poulain D., Mazeau N. : *Design of anchoring at the top of slopes for geomembranes lining systems* (p. 645-650)

2.2.4. Rencontres Géosynthétiques 99 les 12 et 13 octobre 1999 à Bordeaux organisées par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG)

- O. Crépon, M. Salembier, J. J. Peyre : *Étanchement du parement amont du barrage de l’Echapre - Rewaterproofing the upstream face of Echapre dam*

2.2.5. Rencontres 97 les 8 et 9 octobre 1997 à Reims organisées par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG)

- C. Tisserand, B. Breul, R. Herment : *Le barrage d’Ortolo et ses prédécesseurs : retour d’expérience - Feedback from Ortolo dam and its forerunners*
- D. Poulain, H. Girard, G. Mine, G. Potié : *Étanchéité par géomembranes du barrage du Selvet - Waterproofing of the Selvet dam with a geomembrane*
- D. Cazzuffi : *Évaluation du comportement des géomembranes non protégées sur des barrages des Alpes Italiennes - Evaluation of the behaviour of non protected geomembranes applied to some dams of Italian Alps*
- J.-P. Levillain : *De l’importance de la continuité de l’étanchéité d’une géomembrane sur le parement amont d’une digue réservoir - About the importance of the watertightness continuity of a geomembrane on the upstream face of a reservoir dike*
- B. Breul, R. Herment : *Étanchéité en géomembrane bitumineuse du bassin de stockage des Manes - Bituminous geomembrane waterproof lining to Manes storage reservoir*
- A. Rollin : *Les géomembranes bitumineuses manufacturées - Prefabricated bituminous geomembranes*
- D. Gourvat, J. D. Asser : *Des nouveaux géosynthétiques pour la protection des géomembranes, les géoconteneur-sable - New geosynthetic systems for geomembrane protection, sand containers*

2.2.6. EUROGEO1 - First European Geosynthetics Conference, Maastrich septembre 30 - October 2, 1996 « Geosynthetics : Applications, Design and Construction » Proceeding

- P. Sembenelli : *Geomembranes for earth and rock dams: state of the art report*
- G. L. Vaschetti, A. Scuro : *Geomembranes for masonry and concrete dams: state of art report*
- H. Girard, C. Tisserand, M. Lefranc : *Waterproofing and rehabilitation of dams by geomembranes in France*

2.2.7. Colloque Technique Comité Français des Grands Barrages (CFGB) et le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) consacré aux géotextiles et géomembranes dans les barrages (Paris le 11/6/96)

- D. Fayoux : *Les géomembranes dans les barrages et réservoirs : constituants, fonctions et applications*
- M. Lefranc : *Barrages en béton du parc EDF munis d'une membrane préfabriquée*
- R. Tourment : *Réhabilitation du barrage de Trégat - The Tregat dam rehabilitation*
- S. Chabroux : *Barrage en maçonnerie muni d'une géomembrane : Le barrage de Chartrain*

2.2.8. Rencontres 93 les 29 et 30/9/93 à Joué-les-Tours organisées par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG)

- J. Saintot, F. Isambert, B. Simon, G. Potié : *Barrage de Borfloc'h à Belle-Ile-en-Mer - Borfloc'h dam at Belle-Ile-en-Mer*
- C. Tisserand : *L'étanchéité par géomembrane du barrage de Figari. – Geomembrane waterproofing for Figari dam*

2.2.9. Sixth International Conference on Geosynthetics - Rotterdam 1990

- E. Alonso, G. Degoutte, H. Girard : *Results of seventeen years of using geomembranes in dams and basins. 6th IGS International Conference, Den Hoed (ed) 1990 Balkma Rotterdam*

2.2.10. Colloque étanchéité superficielle Paris 1983

- D. Loudière : *Rapport général du Colloque « Étanchéité superficielle » Paris 1983*
- A. Grossmann : *Le barrage Codole : une seconde expérience d'étanchéité par membrane mince sur un grand barrage - Codole Dam: second experience of watertightness by thin layer on a great dam*
- P. M. Spillemaeker : *Utilisation des géomembranes bitumineuses dans les barrages - The use of bituminous membranes in dam construction*
- A. Cassard, G. Degoutte : *Étanchéité de petits barrages en terre dans le Var - Unnatural watertightness small embanked dams in French department Var*
- C. Tisserand : *La protection d'une membrane par pavés autoblocants au barrage de l'Opédale - Interlocking concrete slabs employed as a protection system for the thin membrane at Ospedale dam.*

2.2.11. Autres congrès - Other international congress

2.2.11.1. General communications

- J. A. Wilkes, A. Scuro, G. L. Vaschetti : *Repair of Concrete Face Rockfill Dams in cold climates: Salt Springs, USA, and Midtbotnvatn, Norway - Proceedings, Canadian Dam Association 2005 Conference, Calgary, Canada, October 1-6 2005*

- A. Scuero, G. L. Vaschetti, J. A. Wilkes : *Construction of new exposed waterstops, and their application to repair of CFRD* - Proceedings, Concrete Face Rockfill Dam & the 20th Anniversary of China's CFRD Construction, Yichang, China, September 19-26, 2005
- A. Scuero, G. L. Vaschetti : *Synthetic geomembranes in RCC dams: since 1984, a reliable cost effective way to stop leakage* - Proceedings, 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain, November 17-19, 2003
- E. K. Schrader : *Performance of Roller Compacted Concrete (RCC) dams - an honest assessment* - Proceedings, 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain, November 17-19, 2003
- M. Blanco, A. Leiro, J. Soriano, E. Aguiar, V. Armendáriz, T. Vara : *Influencia de la orientación en el deterioro de la geomembrana sintética utilizada como pantalla de impermeabilización en el embalse de la Cruz Santa* - Proceedings, VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad en la Construcción. Mérida, México, September 2003
- M. Blanco, E. Aguiar, G. Zaragoza : *Patología de geomembranas sintéticas instaladas como pantallas impermeabilizantes en embalses* - Proceedings, International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams - Madrid, Spain, November 11-13, 2002
- A. Scuero, G. L. Vaschetti : *Uplift control and remedial measures with synthetic membranes* - Proceedings, International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams - Madrid, Spain, November 11-13, 2002
- L. Scheuer : *Long-term experiences with an asphalt membrane at Agger Dams* - Proceedings, International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams - Madrid, Spain, November 11-13, 2002
- J. C. de Cea Azañedo, E. Asanza Izquierdo, M. Blanco : *Algunas ideas relativas a la protección e impermeabilización de paramentos de presas de hormigón* - Proceedings, International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams - Madrid, Spain, November 11-13, 2002
- J. Wilkes, A. Scuero, G. L. Vaschetti : *Geomembrane facing systems for RCC dams* - Proceedings, Dams - Innovations for Sustainable Water Resources, 22nd Annual USSD Conference, San Diego, USA, June 24-28, 2002
- M. Blanco : *La impermeabilización de balsas y de embalses mediante geosintéticos* - Proceedings, II Simposio Nacional de Geosintéticos. Madrid, Spain, April 2002
- A. Leiro : *Propiedades más relevantes de los materiales, los ensayos y la normativa técnica española e internacional* - Proceedings, II Simposio Nacional de Geosintéticos. Madrid, Spain, April 2002
- A. Scuero, G. L. Vaschetti : *Exposed waterstops for joints and cracks in RCC dams* - Proceedings, International Workshop on Roller Compacted Concrete - Dam Construction in the Middle East, Irbid, Jordan, April 7-10, 2002
- A. Scuero, G. L. Vaschetti, J. Wilkes : *New technologies to optimize remedial works in dams: underwater installation of waterproofing revetments* - Proceedings, 11th Biennial Conference of the British Dam Society, Bath, UK, June 14-17, 2000

- D. Cazzuffi : *Long Term Performance of Exposed Geomembranes on Dams in Italian Alp*. Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings 25-29, Vol. II, Industrial Fabrics Association International, Roseville, Minnesota, pp. 1107-1109, March 1998
- A. Scuro, G. L. Vaschetti : *Design, construction and performance of geomembrane facings as repair methods in cold climates* - Proceedings, Upgrading and Refurbishing Hydropower plants VI, Montreal, Canada, October 1-3, 1997
- E. Aguiar, M. Blanco : *Experience in Connection with the Performance of Plasticized poly (vinyl chloride) Sheeting in Tenerife Basin Sealings* - Proceedings, Symposium on Research and Development in the Field of Dams - Crans-Montana, Switzerland, September, 1995
- C. Bernard, H. Girard, F. Gousse : *Laboratory and in situ studies on the durability of geomembranes*. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and related products - Singapore, 5-9 septembre 1994
- M. Blanco, G. Zaragoza, E. Aguiar : *Características de las geomembranas sintéticas de uso común en España utilizadas en la impermeabilización de embalses considerados grandes presas por la legislación vigente* - Proceedings, V Jornadas Españolas de Presas - Torremolinos, Spain, June, 1999
- M. Blanco, A. Leiro, E. Aguiar, G. Zaragoza : *Características de geomembranas sintéticas de distinta naturaleza utilizadas en la impermeabilización de embalses* - Proceedings, International V Congreso de Patología de la Construcción y VII de Control de Calidad, Montevideo, Uruguay, 1999
- M. Blanco : *Las geomembranas sintéticas en la impermeabilización de embalses. I y II. Materiales y seguimiento*, Curso de Técnicas y Utilidades de Aplicación de los Plásticos en el Sector Agropecuario. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, March 1998
- Imaizumi S., Tsuboi M., Doi Y., Shimizu T. et Miyaji H. : *Anchorage stability of a geosynthetic liner buried in a trench filled with concrete* : Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium. Cagliari, Italy, 13-17 October 1997
- H. Girard, D. Loudière, J. Gourlot, P. M. Spillmaker, C. Tisserand : *The French experience of geomembranes in fill dams*. International Conference on geomembranes - Denver U.S.A 1984.

2.2.11.2. Case studies

- A. Scuro, G. L. Vaschetti, J. A. Wilkes : *Design, Construction, and Monitoring of the Upstream Facing System for Olivenhain RCC Dam* - Proceedings, Dam Safety 2004, Phoenix, USA, September 26-29, 2004
- A. Marulanda, A., Castro, J., Silva : *Miel I dam, seepage control and behaviour during impoundment* - Proceedings, 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain, November 17-19, 2003
- F. Abadía Anadón, A. del Palacio Tornos : *Comparison between the execution technologies of Porce II and Beni Haroun dams* - Proceedings, 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain, November 17-19, 2003

- R. A. Klein, R. E. Holderbaum, G. S. Tarbox, R. J. Hartman : *Design of Roller-Compacted Concrete features for the Olivenhain dam* - Proceedings, Dams - Innovations for Sustainable Water Resources, 22nd Annual USSD Conference, San Diego, USA, June 24–28, 2002
- Carter, I. C., Claydon, J. R., Hill, M. J. : *Improving the watertightness of Winscar Reservoir* - Proceedings, 12th Biennial Conference of the British Dam Society, Dublin, Ireland, September 4-8, 2002
- Steiner, J., Hannig, H., Gruber, F. J. : *Comparative investigation of 4 systems for seepage control at Hohenwarte II dam* - Proceedings, Workshop on Modern Techniques for Dams - Financing, Construction, Operation, Risk Assessment - ICOLD 69th Annual Meeting, Dresden, Germany, September 14, 2001
- Lutz H., Brunold H. : *First large scale application of a drained geomembrane sealing in Germany at the Brändbach dam* - Proceedings, Workshop on Modern Techniques for Dams - Financing, Construction, Operation, Risk Assessment - ICOLD 69th Annual Meeting, Dresden, Germany, September 14, 2001
- Onken S. C., Harlan R. C., Wilkes J., Vaschetti G. L. : *The underwater installation of a drained geomembrane system on Lost Creek dam* - Proceedings, CanCOLD, Nova Scotia, Canada, September 27 - October 1, 1998
- H. Girard, D. Poulain, C. Mine, G. Potié : *Installation damage field tests on a geomembrane and waterproofing of the Selvet dam* - Sixth International Conference on Geosynthetics - Atlanta - 1998
- Sembenelli P., Sembenelli G, Scuero A. M. : *Geosynthetic System for the Facing of Bovilla Dam* - Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings, Vol. II, Industrial Fabrics Association International, Roseville, Minnesota, pp. 1099-1105, March 25-29 1998
- Schewe, L. D. : *“Rehabilitation of Mafeteng Dam/Lesotho after Failure”* Repair and upgrading of Dams, Symposium in Stockholm, June 5-7, 1996
- Scuero A. M., Vaschetti G. L. : *Rehabilitation of a Masonry Dam with an Impermeable Flexible Membrane: The Camposecco Dam* - Proceedings, International Conference on Dam Engineering 95, Kuala Lumpur, Malaysia, August 1-2, 1995
- Scuero A. M., Sousa Neves M., Silva Matos D., Machado do Vale J. L., Camelo A. : *Waterproof of the Pracana Dam* - Proceedings, 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapur, september, 1994
- Falk Hendrich : *Rehabilitation of Mafenteng Dams Kindom of Lesotho* - Geosynthetics world Set/october 1994
- Silva Matos D., Liberal A. O. : *Pracana Powerplant Refurbishment and Uprating: an uncommon and challenging project* - Proceedinsg, Uprating and Refurbishing Hydropowerplants IV - International Water Power & Dam Construction, Florence, Italy, December 1993
- Cazzuffi D., Monari F., Scuero A. M. : *Geomembrane waterproofing for rehabilitation of concrete and masonry dams - Lago Nero Dam, Italy* - Proceedings, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering - Geosynthetics Case Histories, March 1993

- Morrison W. R., Gray E. W. Jr. : *“Performance of Mount Elbert Forebay Reservoir Flexible Membrane Lining After 10 Years of Service”* Volume I, Geosynthetics '91, Atlanta, USA, February 26-28
- Ferratini G., Ripellino P. G. : *Barrage de Cignana : réparation du parement amont et mise en œuvre d'une géomembrane d'étanchéité en PVC* - Proceedings, Upgrading and refurbishing hydro powerplants II - International Water Power & Dam Construction, Zurich, Switzerland, October 1989
- Scuero A. M., Monari F. : *Waterproof Covering for the Upstream Face of Existing Concrete Dams with a PVC Geomembrane* - Case Histories: Gravity Dam (Piano Barbellino), Multiple Arches Dam (Molato) - Proceedings, Geosynthetics 89 Conference, San Diego, USA, February 1989
- Pells P.J.N., Williams D. : *“Design and construction of two membrane faced tailings dams - (Covarra and Cracow dams)”*: Conference on Dams of the Australian national Committee 1987

3. ARTICLES IN INTERNATIONAL JOURNALS

- A. Scuero, G. L. Vaschetti : *Geomembrane systems: 45 years history of effective sealing of dams* - The International Journal on Hydropower & Dams, Volume 11, Issue One 2004
- Petersen K. M. : *Lost Creek Dam Rehabilitation - Five Years Later* - The Journal of Dam Safety, Fall 2003, USA
- Briançon L., Girard H., Poulain D., Chareyre B. : *Dimensionnement des tranchées d'ancrage en tête de talus des dispositifs d'étanchéité par géomembrane*, Revue Française de Géotechnique, 101, 1^{er} trimestre 2003
- Editorial on “Washburn Valley Reservoirs” : *about Lindley Wood dam*, Dams & Reservoirs - The Journal of the British Dam Society (which is UK ICOL National Committee), January 2003
- Papadopoulos D. : *Seepage evolution and underwater repairs at Platanovryssi* - The International Journal on Hydropower & Dams - Volume Nine, Issue Six 2002
- Veyhle D., Jaup A. : *Brändbach: Germany's first dam rehabilitation using a géomembrane* - The International Journal on Hydropower & Dams - Volume Nine, Issue Six 2002
- Tech. Notes : *Repair of crack completed for one of Europe's tallest RCC dams* - HRW - Volume Nine, Issue Six 2002
- A. Marulanda, A. Castro, N. R. Rubiano: *Miel I: a 188 m high RCC dam in Colombia* - The International Journal on Hydropower & Dams - Volume Nine, Issue Three 2002
- Briançon L., Girard H., Poulain D., 2002. *Slope stability of lining systems - experimental modeling of friction at geosynthetics interfaces. Geotextiles and geomembranes*, Elsevier, 20 (2002), 147-172.147
- D. Papadopoulos : *Seepage evolution and underwater repairs at Platanovryssi* - The International Journal on Hydropower & Dams - Volume Nine, Issue Six 2002

- M. Blanco, J. Soriano, E. Aguiar, G. Zaragoza : *Análisis microscópico de geomembranas sintéticas utilizadas en la impermeabilización de embalses*, Ing. Civil 127 51-59 (2002)
- M. Blanco, E. Aguiar : *Aspectos más relevantes del comportamiento en obra de los materiales sintéticos utilizados como geomembranas impermeabilizantes en embalses ubicados en la Comunidad Autónoma de Canarias*, Ing. Civil 117 25-35 (2000)
- L. D. Schewe : *Rehabilitation of an old German masonry dam* - The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Five 1999, pp. 60-63
- C. Tisserand, J. A. Sanguinetti, B. Breul, Y. Gimenes, E. Antomarchi, R. Herment : *Le barrage d'Ortolo, étanchéité par une géomembrane Colétanche*. Revue Travaux n° 746 octobre 1998
- M. Blanco, A. Cuevas, E. Aguiar, G. Zaragoza : *Las geomembranas sintéticas en la impermeabilización de embalses*, Rev. Plast. Modernos, 75 (500), 187-195 (1998)
- M. Blanco, E. Aguiar : *Geomembranas sintéticas a base de polietileno de alta densidad utilizadas en la impermeabilización de embalses. Seguimiento de obras en las Islas Canarias*, Ing. Civil 109 49-59 (1998)
- Hullings D. E., Leonard J. S. : *Design concerns and performances of geomembrane anchor trenches*, Geotextiles and Geomembranes, Elsevier, 15 (1997), 403-417
- W. B. Bingham, P. G. Schweiger : *The Penn Forest RCC replacement dam, USA* - The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Five, pp. 66-68, 1997
- D. Papadopoulos : *RCC placement completed at Platanovrissi dam in Greece* - The International Journal on Hydropower & Dams, Volume 4, Issue Five, 1997, pp. 59-61
- News : *Geosynthetic membrane installed at Nacaome dam, Honduras*, The International Journal on Hydropower & Dams, September 1995
- T. De Beauchamp : *Concrete swelling and reinforcement measures at the Chambon dam* - The International Journal on Hydropower and Dams, March 1994
- Kennard, M. F., Reader, R. A., and Hughes, A. K. : "Xylourikos and Symvoulos dams in Cyprus", Dams & Reservoirs - The Journal of the British Dam Society (which is UK ICOL National Committee) Discussion paper presented February 1992, vol 2 No 1
- G. Garnier, M. Guérinet : *Le Barrage du Riou (Hautes-Alpes) : une approche des BCR rustiques* - Travaux n° 665, mai 1991
- J. Clerin, C. Gilbert, C. Bienaimé, R. Herment : *Massif Central : un barrage en remblai étanché à l'amont par une géomembrane bitumineuse : Mauriac (Cantal) - A rockfill dam with a bituminous geomembrane upstreamfacing*. Revue Travaux n° 665 mai 1991
- H. Girard, S. Fisher, E. Alonso : *Problems of friction posed by the use of geomembrane on dam slopes - Examples and measurements*. Geotextiles and geomembranes 9 (1990) Elsevier Science Publishers Ltd England

- G. Zuccoli, C. Scalabrini, A. M. Scuero : *The use of a geomembrane for an arch dam repair*, Water Power & Dam Construction, February 1989

4. BOOKS

- *Geotextiles and geomembranes* - Official journal of the International Geosynthetic Society (IGS) Editor R.K.Rowe - (www.elsevier.com/locate/geomem)
- *Exposed geomembranes in water conveyance structures - State of the art - Guidelines for design, supply, installation*, TUM - Technische Universität München, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Munich 2005
- *Application of Geosynthetics in Irrigation and Drainage Projects*, Hervé Plusquellec, published by ICID - CIID, International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi, India, September 2004
- *Géomembranes - Guide de Choix*. Rollin L. A., Pierson P., Lambert S., 2002, Presses Internationales Polytechnique, Montréal.
- Gannet Fleming : *Facing Systems for Roller-Compacted Concrete Dams & Spillways* - Portland Cement Association, Skokie, USA, 2001
- *Étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier - Guide Technique et Guide complémentaire* - Ministère Français de l'Équipement des Transports et du Logement Nov. 2000 Edité et diffusé par le SETRA (www.setra.equipement.gouv.fr) et le LCPC (www.lcpc.fr)
- Recommended descriptions of geosynthetics - Functions, geosynthetics terminology, mathematical and graphical symbols - 4th edition IGS August 2000
- *Designing with Geosynthetics*, Koerner R.M. - 292, Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA - 4th edition 1997/12/15
- *Recommandation pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes* - Fascicule N° 10 du Comité Français des Géosynthétiques (<http://www.cfg.asso.fr/>)
- "A Constructibility Demonstration of Geomembrane Systems Installed Underwater on Concrete Hydraulic Structures", Christensen J. C., Marcy M. A., Scuero A. M., Vaschetti G. L. - Technical Report REMR-CS-51, US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA, December 1996
- "A Conceptual Design for Underwater Installation of Geomembrane Systems on Concrete Hydraulic Structures", Christensen J. C., Marcy M. A., Scuero A. M., Vaschetti G. L. - Technical Report REMR-CS-50, US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA, September 1995
- *Manual para el diseño, construcción y explotación de embalses impermeabilizados con geomembranas* - Amigó,E., Aguiar,E.1994, Gobierno de Canarias Ed., España
- *Los geotextiles como nuevos materiales orgánicos en la Obra Pública* - A. Leiro, M. Blanco. 1990, Pub. CEDEX M-17, Ed. Anzos, Madrid

5. APPLICATION NORMS

5.1. GEOMEMBRANE INTERNATIONAL STANDARDS

- Inventory on Geomembrane Standards : next publication by IGS

5.2. NORMES EUROPEENNES ET/OU INTERNATIONALES

- NF EN 918 Essai de perforation dynamique (Essai par chute d'un cône)
- NF EN 963 Échantillonnage - Prélèvement des éprouvettes.
- NF EN 964-1 Détermination de l'épaisseur (couches individuelles)..
- NF EN 965 Détermination de la masse surfacique.
- NF EN 1897 Détermination des propriétés de fluage en compression.
- NF EN 12224 Détermination de la résistance aux essais climatiques.
- NF EN 12225 Méthode pour la détermination de la résistance microbiologique par un essai d'enterrement.
- NF EN 12226 Essais généraux pour l'évaluation après les essais de durabilité.
- NF EN 12447 Méthode d'essai sélective pour la détermination de la résistance à l'hydrolyse dans l'eau
- NF EN 13254 Géotextiles et Produits apparentés - caractéristiques requises pour l'utilisation dans la nstruction des Réservoirs et barrages
- NF EN 13255 Géotextiles et Produits apparentés - caractéristiques requises pour l'utilisation dans la nstruction des Canaux
- NF EN 13562 Détermination de la résistance à la pénétration de l'eau.
- NF EN 14030
- NF EN 14030/A1 Méthode d'essai sélective pour la détermination de la résistance aux liquides acides et alcalins.
- NF EN ISO 9863-2 Détermination de l'épaisseur à des pressions prescrites. Méthode de détermination de l'épaisseur des couches individuelles de produits multicouches
- NF EN ISO 10319 Essai de traction des bandes larges.
- NF EN ISO 10320 Identification sur site.
- NF EN ISO 10321 Essai de traction pour joints/coutures par la méthode de la bande large.
- NF EN ISO 11058 Détermination des caractéristiques de perméabilité à l'eau normalement au plan, sans contrainte mécanique.
- EN ISO 12236 Essai de poinçonnement statique (essai CBR)
- NF EN ISO 13426-1 Résistance des liaisons des structures internes.
- NF EN ISO 13427 Simulation de l'endommagement par abrasion (essai du bloc glissant)
- NF EN ISO 13431 Détermination du comportement en fluage et de la rupture au fluage en traction.

- NF EN ISO 13437 Méthode pour l'installation et l'extraction d'échantillons dans le sol et pour la réalisation d'essais en laboratoire sur les éprouvettes.

5.3. NORMES XP ENV ET ISO

- XP ENVISO 10722-1 Mode opératoire de simulation des dégâts lors de l'installation. Installation dans les matériaux granulaires.

5.4. AUTRES NORMES

- UNE 104 421 Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de polietileno de alta densidad (PEAD) o láminas de polietileno de alta densidad coextruido con otros grados de polietileno
- UNE 104 423 Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) no resistentes al betún
- PrEN 13361 Geosynthetic barriers. Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams.
- EN 13254 Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams.

DISPOSITIFS D'ÉTANCHEITÉ PAR GÉOMEMBRANES POUR LES BARRAGES

*Principes de conception
et retour d'expérience*

Commission Internationale des Grands Barrage – 61, Avenue Kléber 75116 Paris
Tél. : (33-1) 47 04 17 80 - Fax : (33-1) 53 75 18 22
E-mail : secretaire.general@icold-cigb.org
Site : <http://www.icold-cigb.net>

PRÉPARÉ PAR LE GROUPE DE TRAVAIL EUROPÉEN :

Président et coordinateur : A. Scuero (Comité national italien)

Secrétaire : G. Vaschetti (Comité national italien)

E. Aguiár González (Balsas de Tenerife, Espagne),

P. Bartek (Comité national suisse),

M. Blanco Fernández
(Laboratorio Central De Estructuras Y Materials C.D.E.X., Espagne),

P. Brezina (Povodi Odry, République Tchèque),

H. Brunold (Comité national australien),

D. Cazzuffi (CESI, Italy),

H. Girard (Cemagref, France),

M. Lefranc (Comité national français),

J. L. Machado do Vale (Comité national portugais),

C. Massaro (Azienda Energetica Metropolitana Torino),

J. Millmore (Comité national britannique),

L. Schewe (Comité national allemand),

P. Sembenelli (Comité national italien),

Avec l'assistance de R.M. Koerner (GSI, USA).

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	255
1.1. Champ d'application	255
1.2. Vue d'ensemble des géosynthétiques	256
1.3. Contenu du bulletin	258
2. MATÉRIAUX, ESSAIS, VIEILLISSEMENT	260
2.1. Les matériaux	260
2.1.1. Géomembranes polymères	260
2.1.1.1. <i>Classification</i>	260
2.1.1.2. <i>Composition</i>	262
2.1.1.3. <i>Configurations</i>	263
2.1.1.4. <i>Forme de la fourniture</i>	264
2.1.2. Géomembranes bitumineuses	265
2.1.2.1. <i>Principe et composition</i>	265
2.1.2.2. <i>Configuration</i>	265
2.1.2.3. <i>Forme de la fourniture</i>	265
2.1.3. Composition des géomembranes et eau potable	266
2.1.4. Soudures	266
2.1.4.1. <i>Géomembranes polymères</i>	267
2.1.4.2. <i>Géomembranes bitumineuses</i>	269
2.1.5. Comportement comparatif des géomembranes	270
2.1.6. Géotextiles et produits connexes	270
2.2. Essais de géomembranes	273
2.2.1. Type d'essais suivant les fonctions	273
2.2.2. Essais d'identification et essais de performance	274
2.2.3. Analyse chimique et identification des polymères	274
2.2.4. Propriétés physiques et mécaniques, et méthodes d'essai	275
2.2.4.1. <i>Perméabilité à l'eau</i>	275
2.2.4.2. <i>Comportement en traction uniaxiale sur des bandes étroites (essai d'identification)</i>	275
2.2.4.3. <i>Comportement en traction axisymétrique sur des échantillons de grande taille (essai de performance)</i>	276
2.2.4.4. <i>Résistance au poinçonnement (essai d'identification/performance)</i>	278
2.2.4.5. <i>Résistance à l'impact (essai d'identification/de performance)</i>	280
2.2.4.6. <i>Résistance à la déchirure (essai d'identification/de performance)</i>	280

2.2.4.7. Résistance en cisaillement à l'interface (essai d'identification/de performance)	280
2.2.4.8. Test de l'ancrage par insertion (essai d'identification/de performance)	284
2.2.4.9. Comportement à la traction des soudures (essai d'identification/de performance)	284
2.2.4.10. Fissuration sous contrainte (essai d'identification/de performance)	284
2.2.5. Durée de vie et méthodes d'essais	284
2.2.5.1. Rayonnement ultraviolet (essai d'identification/de performance)	285
2.2.5.2. Agression thermique	285
2.2.5.3. Effets biologiques	286
2.2.5.4. Agression chimique (essai d'identification/de performance)	287
2.2.5.5. Oxydation	289
2.2.5.6. Effets de synergie	289
2.2.6. Essais spécifiques pour les géomembranes bitumineuses	289
2.2.7. La norme CEN EN 13361 « Barrières géosynthétiques - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des réservoirs et des barrages recourant à ces techniques »	289
2.3. Vieillessement des géomembranes. Expérience de terrain	294
2.3.1. Prévision de durée de vie basée sur les résultats de terrain	295
2.3.1.1. Polychlorure de Vinyle (PVC) plastifié	296
2.3.1.2. Polyéthylène linéaire basse densité (PELBD) et polyéthylène haute densité (PEHD)	297
2.3.1.3. Elastomère	298
2.3.1.4. Polyéthylène chlorosulfoné (CSM)	298
2.3.1.5. Polypropylène (fPP)	299
2.3.1.6. Polyéthylène chloré (CM)	299
2.3.1.7. Géomembranes bitumineuses	300
2.3.2. L'expérience espagnole	300
2.3.3. L'expérience de l'utilisation sur les toits	300
2.4. Géotextiles et produits connexes : caractéristiques et méthodes d'essai	301
2.5. Quelques remarques pour finir	301
3. CHARGES APPLIQUÉES SUR LES DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANES (DEG)	302
3.1. Introduction	302
3.2. Charges mécaniques	302
3.2.1. Charge due à la gravité	302
3.2.2. Déformation différentielle du support	304

3.2.3. Charge de poinçonnement	304
3.2.4. Charge due au vent	305
3.2.5. Vagues dans le réservoir	307
3.2.6. Glace dans le réservoir	307
3.2.7. Soulèvement par l'eau ou par l'air	308
3.3. Attaques physiques, chimiques et biologiques	309
3.3.1. Chaleur	309
3.3.2. Rayonnement ultraviolet	309
3.3.3. Composants dans l'eau	310
3.3.4. Action biologique (micro-organismes)	310
3.3.5. Végétation	311
3.3.6. Faune	311
3.3.7. Vandalisme	312
4. GÉOMEMBRANES POUR LA CONSTRUCTION ET LA RÉHABILITATION DE BARRAGES EN REMBLAI	313
4.1. Généralités	313
4.1.1. Dispositif amont	314
4.1.1.1. <i>Dispositif de géomembranes exposée</i>	317
4.1.1.2. <i>Dispositif par géomembrane couverte</i>	318
4.1.2. Dispositif interne	318
4.2. Charges	321
4.3. Système amont	324
4.3.1. Généralités	324
4.3.2. Couche d'étanchéité par géomembrane	327
4.3.3. Couche support	328
4.3.4. Couche drainante	330
4.3.5. Zone de transition	331
4.3.6. Ancrage sur le parement	331
4.3.6.1. <i>Généralités</i>	331
4.3.6.2. <i>Ancrage mécanique</i>	332
4.3.6.3. <i>Ancrage par lestage</i>	334
4.3.6.4. <i>Collage</i>	334
4.3.6.5. <i>Ancrage par lest (géomembrane couverte)</i>	335
4.3.7. Ancrage en périphérie	338
4.3.7.1. <i>Ancrage mécanique</i>	339
4.3.7.2. <i>Ancrage de type insert</i>	340
4.3.7.3. <i>Ancrage par lest</i>	340
4.3.8. Ancrage autour des conduites et autres pénétrations	341
4.4. Dispositif interne	342

4.5. Mise en place	343
4.5.1. Couche support	343
4.5.2. Placement de la géomembrane	347
4.6. Exemples typiques	349
4.6.1. Nouvelle construction, géomembrane bitumineuse couverte ...	349
4.6.2. Nouvelle construction, géomembrane PVC exposée	350
4.6.3. Nouvelle construction, géomembrane PVC couverte	351
4.6.4. Nouvelle construction, géomembrane PVC couverte	352
4.6.5. Réparation, géomembrane PVC exposée	353
4.6.6. Réparation, géomembrane PVC couverte.....	355
5. GÉOMEMBRANES SUR LES BARRAGES BÉTON ET MAÇONNERIE.....	356
5.1. Gamme d'applications	356
5.1.1. Applications dans la construction de nouveaux barrages	356
5.1.2. Applications pour la réhabilitation des barrages	357
5.2. Principes de conception	361
5.2.1. Dispositifs partiels d'étanchéité	362
5.2.2. Dispositifs d'étanchéité exposés	363
5.2.3. Dispositif d'étanchéité couvert	363
5.3. Contraintes	364
5.4. Dispositif d'étanchéité par géomembranes – concepts généraux	364
5.4.1. Introduction	364
5.4.2. Géomembrane	364
5.4.3. Couche support	366
5.4.4. Couche anti-poinçonnement	367
5.4.5. Ancrage	368
5.4.6. Dispositif de drainage et de ventilation	370
5.4.6.1. Généralité	370
5.4.6.2. Conception du dispositif de drainage	371
5.4.6.3. Construction	375
5.4.7. Géomembranes exposées et dispositifs d'ancrage	375
5.4.8. Géomembrane couverte et couche de couverture	380
5.5. Techniques d'installation	381
5.5.1. À sec	381
5.5.2. Immergée	383
5.6. Exemples classiques	384
5.6.1. Réhabilitation d'un barrage en maçonnerie, géomembrane en PVC exposée, installation à sec	384

5.6.2. Réhabilitation d'un barrage à contreforts affecté par alcali-réaction, géomembrane PVC, installation à sec	387
5.6.3. Réhabilitation du barrage à voûtes multiples, géomembrane PVC exposée, installation à sec	388
5.6.4. Nouveau parafouille élastique, géomembrane PELBD	389
5.6.5. Réhabilitation d'un barrage voûte, géomembrane PVC exposée, installation immergée	390
6. GÉOMEMBRANES POUR LES BARRAGES EN BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU - NOUVELLE CONSTRUCTION, RÉHABILITATION ET JOINTS INDUITS	391
6.1. Gamme d'applications	392
6.1.1. Applications pour la construction de nouveaux barrages	392
6.1.2. Application à la réhabilitation des barrages BCR	394
6.2. Principes de conception	394
6.2.1. Généralités	394
6.2.2. Dispositifs d'étanchéité exposés	398
6.2.3. Dispositifs d'étanchéité couverts	398
6.2.4. Comparaison des deux systèmes	399
6.3. Charges	400
6.4. Dispositif d'étanchéité par géomembrane	400
6.4.1. Généralités	400
6.4.2. Géomembrane	401
6.4.3. Surface support et protection inférieure de la géomembrane étanche	402
6.4.4. Dispositif de drainage et de ventilation	402
6.4.5. Collecte et évacuation des eaux drainées	403
6.4.6. Système d'ancrage sur le parement du barrage	403
6.4.7. Ancrage en crête	404
6.4.8. Ancrage sur le périmètre immergé	404
6.5. Techniques d'installation	404
6.5.1. Dispositifs d'étanchéité exposés	404
6.5.1.1. <i>Installation simultanée</i>	404
6.5.1.2. <i>Installation postérieure</i>	407
6.5.2. Dispositif par géomembrane couverte	407
6.6. Exemples	409
6.6.1. Géomembrane PVC exposée installée après avoir terminé le barrage, géofilet sur tout le parement amont	409

6.6.2. Géomembrane PVC exposée avec une épaisseur variable suivant la charge hydrostatique, installée pendant la construction du barrage	410
6.6.3. Géomembrane PVC couverte, partie intégrante des panneaux préfabriqués utilisés comme coffrage permanent pour la construction du barrage	411
7. CAS SPÉCIAUX	
7.1. Généralité	413
7.2. Dispositif destiné à la préparation des joints et fissures	413
7.2.1. Généralités	413
7.2.2. Support	414
7.2.3. Ancrage	415
7.2.4. Fixation à la périphérie	415
7.2.5. Couche de couverture	416
7.3. Dispositif sur joints de dilatation induits (barrages BCR)	416
7.3.1. Généralités	416
7.3.2. Conception	418
7.3.3. Préparation du support	419
7.4. Type de géomembrane	420
7.5. Applications immergées	421
7.6. Exemples classiques	421
7.6.1. Géomembrane PVC exposée pour la réparation de joints endommagés/fissurés	421
7.6.2. Géomembrane PVC exposée sur les joints de contraction où des déplacements importants sont prévus	422
7.6.3. Géomembrane PVC exposée sur des joints fuyants	422
7.6.4. Géomembrane PVC exposée sur joints de dilatation dès la construction	423
7.6.5. Installations à sec et immergées : géomembrane PVC exposée sur joints et fissure	424
8. CONTRÔLE QUALITÉ D'UN DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE	426
8.1. Introduction	426
8.2. Contrôle qualité et assurance qualité	426
8.3. Éléments du CQF	428
8.4. Procédures pour assurer le maintien en bon état de la géomembrane	428
8.5. Contrôle qualité-construction	429
8.5.1. Réception des matériaux sur site	430

8.5.2. Réception de la couche support	431
8.5.3. Installation du géotextile	432
8.5.4. Installation des lés/panneaux de la géomembrane	433
8.5.5. Installation d'un système de fixation sur le parement amont	434
8.5.6. Assemblage des lés/panneaux de la géomembrane (joints confectionnés sur site)	434
8.5.7. Étanchéité des joints périphériques	436
8.5.8. Inspection finale du positionnement de la géomembrane	436
8.5.9. Pose de la couche de couverture	438
8.5.10. <i>Contrôle final du dispositif d'étanchéité par géomembranes</i>	439
8.5.11. <i>Documentation</i>	439
9. CONSEILS SUR LE CONTENU TECHNIQUE DES CONTRATS	440
9.1. Aspects généraux	440
9.2. Spécifications techniques	445
9.2.1. Matériaux	445
9.2.1.1. <i>Matériaux synthétiques</i>	446
9.2.1.2. <i>Matériaux de fixation</i>	446
9.2.1.3. <i>Matériaux de drainage</i>	447
9.2.1.4. <i>Autres matériaux</i>	447
9.2.2. Dispositif d'étanchéité	448
9.2.2.1. <i>Description des éléments</i>	448
9.2.2.2. <i>Préparation de la surface</i>	448
9.2.2.3. <i>Raccordement des lés/rouleaux</i>	449
9.2.2.4. <i>Joint périphérique</i>	449
9.2.2.5. <i>Système de drainage</i>	449
9.2.2.6. <i>Fixation</i>	449
9.2.2.7. <i>Preuve de conformité du matériel proposé</i>	449
9.2.2.8. <i>Preuve de conformité du système de fixation</i>	450
9.2.3. La couche de couverture	450
9.3. Calendrier et programme d'installation	450
9.4. Plan de contrôle qualité	451
9.5. Les critères d'acceptation des travaux réalisés	451
9.5.1. Le revêtement	451
9.5.2. Fixations	452
9.5.3. Soudures	452
9.5.4. Fuites	452
9.6. Garantie	453
9.7. Devis quantitatif et conditions	453
9.8. Remarques pour conclure	454

9.9. Annexes	456
9.9.1. Check list	456
9.9.2. Conformité aux instructions figurant dans le Dossier d'A.O.	460
9.9.3. Exemple de garantie	461

Solution techniques/géomembranes utilisées dans les exemples cités :

- *Annexe 1 (base de données pour les 280 barrages dans lesquelles des géomembranes ont été utilisées) est disponible à la CIGB.*
- *Annexe 2 (liste et définitions pour la technologie des géomembranes) : dans le texte anglais seulement.*
- *Annexe 3 (les références principales sur les normes d'essai et sur l'utilisation et l'application de géomembranes dans les barrages) : dans le texte anglais seulement.*

AVANT-PROPOS

La première édition de ce bulletin a été publiée en 1981 (bulletin 38 (*)). Il s'agissait d'un guide technique détaillé, accompagné de références exhaustives : les différents types de membranes et leurs caractéristiques y étaient passés en revue, ainsi que les contraintes théoriques et réelles rencontrées; des procédures à développer y étaient détaillées, accompagnées d'exemples.

En 1991, un nouveau Bulletin 78, « Étanchéité des barrages par géomembranes. Technique actuelle » (**), présentait 70 barrages utilisant des géomembranes, et mettait l'accent sur les matériaux nouveaux ou améliorés désormais disponibles, sur l'expérience collectée qui permettait une meilleure compréhension de leur utilisation et sur les concepts techniques pointus dans ce domaine, à l'origine d'une mise en œuvre dans des barrages plus élevés qu'auparavant. Le Bulletin 78 traitait de nouveaux domaines, comme l'amélioration des caractéristiques d'étanchéité d'autres parements, la réparation de barrages poids anciens et des parements béton amont des barrages en remblai. Et pour finir, le Bulletin 78 présentait de nouvelles idées concernant le drainage, les couches de support et les couches de protection, ainsi que les géomembranes que l'on étudiait à l'époque (1990) pour le parement amont des barrages béton compacté rouleau.

Cette nouvelle édition de 2010 cite 280 barrages, et met à jour les données et recommandations des deux premiers bulletins 38 et 78. Elle passe en revue les nouvelles informations et pratiques apparues entre-temps, notamment des applications pour lesquelles les géomembranes sont le seul élément étanche de barrages en remblai (Bovilla, Albanie, 91 m, 1996), de barrages BCR (Miel 1, Colombie, 188 m, 2002), pour lesquelles elles jouent le rôle de joints externes sur des barrages BCR (Porce II, Colombie, 118 m, 2000), ou de réparation sous l'eau de barrage poids (Lost Creek, USA, 36 m, 1997) et de barrages BCR (Platanovryssi, Grèce, 95 m, 2002).

Ce nouveau Bulletin traite également de l'utilisation de géomembranes pour des barrages affectés par RAG (Pracana, Portugal, 65 m, 1992). Le Bulletin présente l'étanchement de joints défectueux et de fissures sur le parement béton amont de barrages en enrochement grâce à des bandes de géomembranes fixées mécaniquement (Strawberry, USA, 101 m, 2002).

Les 280 barrages mettant en œuvre des géomembranes et cités dans ce bulletin sont en remblai (188) ou en béton + BCR (91 + 1 de type inconnu). Parmi ceux-ci, 48 se trouvent aux États-Unis, 47 en Chine, 42 en France, 35 en Italie, 10 en Espagne et 10 en Allemagne, 9 en Autriche, 6 en République Tchèque, 5 au Portugal, 4 en Bulgarie et 4 au Royaume-Uni, 2 en Suisse, ainsi qu'en Belgique, Chypre, Roumanie et Slovaquie, et 5 répartis dans d'autres pays européens. L'Europe et les États-Unis possèdent plus de 67 % du total (188 barrages). En raison de la grande expérience accumulée en Europe, cette mise à jour a été préparée par le Groupe de travail européen sur les géomembranes appliquées au revêtement des barrages, nommé par la Commission internationale des grands barrages, avec l'assistance de certains experts des États-Unis. Ce Bulletin offre au lecteur l'expérience effective mondiale de l'utilisation des géomembranes, la plus

ancienne ayant été posée il y a plus de 45 ans, et toujours en service. Nous remercions chaleureusement tous les auteurs, notamment Alberto Scuero, coordinateur du groupe, Gabriella Vaschetti, secrétaire, et d'autres membres du groupe, dans l'ordre alphabétique, Blanco, Cazzuffi, Girard, Koerner, Lefranc, Millmore, Schewe, Sembenelli, Vale.

A. MARULANDA
Président,
Comité des matériaux pour barrages en remblai

() Rapport rédigé par R. Corda et H. Grassinger, membres du Comité des matériaux pour barrages en remblai, avec l'assistance de K. Rienössl (Comité national autrichien) et J. Combelles, J. Couprie, P. Huot, V. Lelu, D. Loudière et P. Paccard (Comité national français).*

*(**) Rapport rédigé par R. Corda, membre du Comité des matériaux pour barrages en remblai, avec l'assistance de G. Degoutte et C. Bernhard (CEMAGREF, France), L.O. Timblin et W. R. Morrisson (USCOLD) et D. Cazzuffi (ENEL, Italie).*

1. INTRODUCTION

1.1. CHAMP D'APPLICATION

D'après l'IGS (International Geosynthetic Society établie en 1983), une géomembrane est « une feuille plane, relativement imperméable, polymère (synthétique ou naturelle) utilisée en contact avec le sol ou le roc et/ou sur tout autre matériau géotechnique pour des applications de génie civil ».

Les géomembranes sont constituées de feuilles de polymères continues relativement minces, mais elles peuvent également être fabriquées par imprégnation de géotextiles par du bitume ou des sprays élastomères, ou sous la forme de géocomposites bitumineux multi-couches. Ces feuilles sont préfabriquées en usine et transportées sur site, où elles sont positionnées et soudées sur place.

Depuis plus de 45 ans, les géomembranes ont été utilisées avec succès pour constituer un parement étanche sur des nouveaux barrages BCR atteignant 188 m, elles ont été mises en œuvre pour la réparation d'anciens barrages en maçonnerie et en béton atteignant 174 m, et comme élément d'étanchéité sur des barrages en remblais atteignant 198 m. Suivant les cas, l'installation a été effectuée à l'air libre ou en mode immergé.

Tableau 1
Nombre total de barrages équipés de géomembranes*

Type de barrage	Nombre de barrages	% du total
Remblais	183	69.1
Béton	47	17.7
BCR	34	12.8
Inconnu	1	0.4
Total	265	100.0

*La date de clôture pour la base de données, source des Tableaux et Figures, est le 31 décembre 2006. La base de données mise à jour est disponible à la CIGB.

En s'appuyant sur les expériences positives et sur l'expansion prévue de l'utilisation des géomembranes dans les barrages, ce Bulletin met l'accent sur les géomembranes polymères et bitumineuses continues fabriquées en usine, et leur application dans la construction des barrages. Les informations et recommandations qui suivent transmettent des connaissances détaillées sur les caractéristiques et atouts d'un parement équipé d'une géomembrane, afin d'obtenir des solutions bien définies, bien conçues, bien construites et bien vérifiées.

Le produit synthétique « géomembrane » fait partie du « dispositif d'étanchéité par géomembranes », abrégé en DEG, un système de couches superposées nécessaires pour la construction, la mise en place et la conservation de l'étanchéité d'un ouvrage, et notamment dans le cadre de ce Bulletin, d'un barrage. Un dispositif d'étanchéité par géomembranes est composé généralement de plusieurs couches de

matériau géosynthétique ou naturel, qui assurent la protection, le renfort ou le drainage aval. C'est pourquoi la conception d'un dispositif d'étanchéité par géomembranes demande d'étudier l'ensemble du système et non uniquement la géomembrane.

La plupart des présentes recommandations s'appliquent bien sûr également aux barrages de taille inférieure à 15 m, au revêtement de digues, de canaux, de galeries hydrauliques, de bassins et de réservoirs de tous types.

1.2. VUE D'ENSEMBLE DES GÉOSYNTHÉTIQUES

Les géosynthétiques sont généralement mis en œuvre dans tous les secteurs où interviennent sur les sols, les roches ou encore la nappe phréatique. Géo est un terme qui se rapporte bien sûr à la Terre. Il semble approprié de le combiner avec le terme *synthétique* puisque les matériaux utilisés sont pratiquement uniquement de fabrication humaine.

Les produits synthétiques ont permis de commencer à écrire un nouveau chapitre passionnant sur les matériaux techniques de construction mis à disposition du secteur du génie civil – et la rapidité avec laquelle ces produits se développent ne laisse pas de nous impressionner. Les raisons pour la montée en puissance des géosynthétiques sont nombreuses, et l'on peut citer :

- ils sont fabriqués en usine sous contrôle qualité avec des caractéristiques constantes,
- ils remplacent généralement les ressources naturelles rares ou absentes,
- ils remplacent les matériaux de construction naturels là où ils sont difficiles à utiliser,
- ils ont permis des applications ou des solutions techniques impossibles auparavant,
- leur utilisation est exigée par la législation dans certains environnements à protéger,
- ils sont (en général) compétitifs en termes de coûts avec les matériaux naturels et le béton qu'ils remplacent,
- ils peuvent être mis en place rapidement,
- en décembre 2009, ils présentent un historique de 50 ans (première utilisation en 1959) qui incite de plus en plus les ingénieurs à les utiliser,
- ils sont vendus et disponibles partout,
- ils peuvent être facilement transportés sur de grandes distances, à des prix relativement bas.

L'utilisation de géosynthétiques en lieu et place de matériaux naturels (sols), ou de matériaux fabriqués par l'homme (béton, acier) a principalement pour objectifs :

- de remplacer les matériaux naturels lorsqu'ils sont absents, rares, ou de qualité inadaptée,
- de fournir une meilleure qualité structurelle (sans détérioration de matériau ou perte d'étanchéité),
- d'effectuer les travaux de manière plus économique (investissement initial plus faible et/ou durée de vie plus longue, donc réduction des coûts de maintenance).

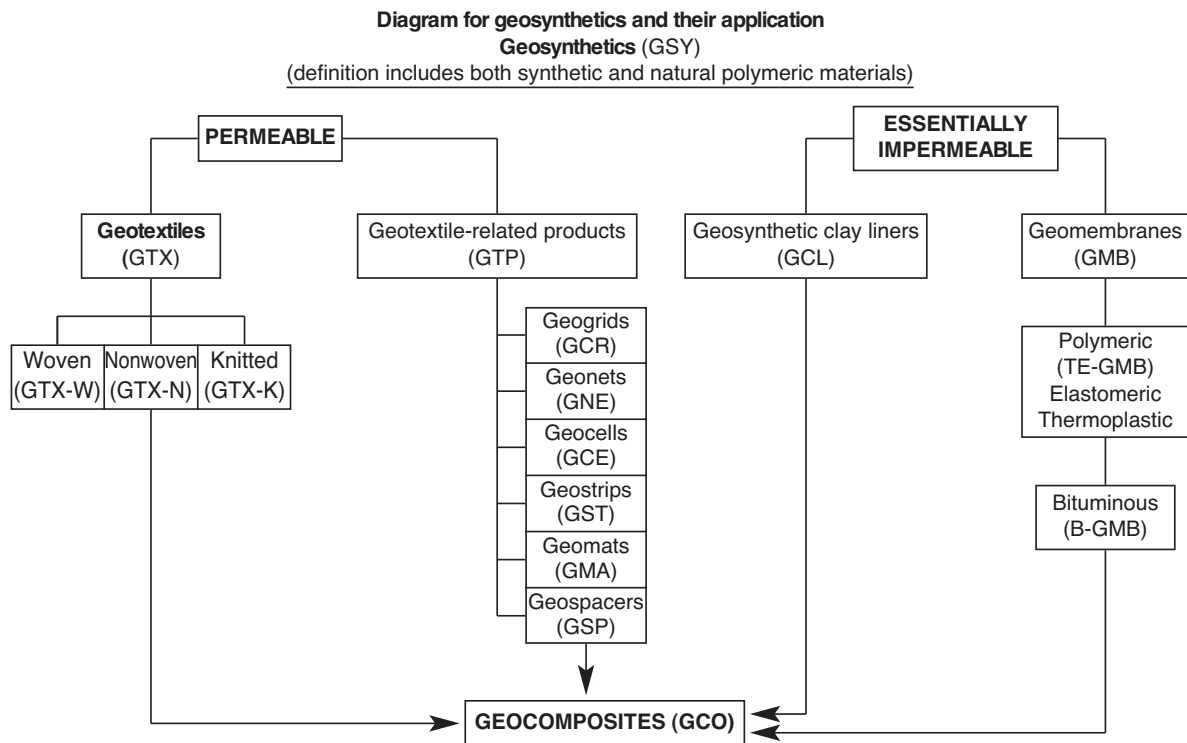


Fig. 1
 Diagramme des géosynthétiques et de leur application

Tableau 2
 Géocomposites (GCO): Quelques exemples par fonction

Séparation	Filtration	Drainage	Renforcement	Protection	Barrière	Contrôle de l'érosion de surface
GTX + fils	GTX + GTX	GSP + GTX (+ GBR*-P)	GTX + GTX	GTX + GTX	GMB + GTX	GTX + GCE
GTX + GTX	GTX + GMA	GTN + GTX (+ GBR-P)	GTX + GGR	GTX + sol	GTX + sol (bentonite)	GGR+ GMA
etc.	etc.	etc.	etc.	GMA + sol	GBR-P + sol (bentonite)	GTX + ensemencement
				GTX + GMA	GTN + sol	etc.
				GTX + GGR	etc.	
				etc.		

NOTE : Tous les géosynthétiques peuvent avoir plusieurs fonctions.

*GBR: Barrières géosynthétiques.

La famille de géosynthétiques utilisés en général dans les barrages est scindée en classes suivant leurs caractéristiques et secteurs d'application.

En raison de leur structure ouverte, l'application principale des géotextiles, géofilets, géo-espaces et géogrilles consiste à séparer, drainer, filtrer et renforcer les sols dans les ouvrages de type barrages en remblai. Ils sont également utilisés en combinaison avec les géomembranes comme couches de protection.

Un géocomposite comprend au minimum un géosynthétique : géotextile et géofilet, géotextile et géomembrane, ou toute autre combinaison de ces matériaux avec d'autres (par exemple feuilles plastiques déformées, câbles d'acier ou ancrages acier). Il s'agit du secteur le plus créatif pour les géosynthétiques : les domaines d'application sont nombreux, et couvrent toutes les fonctions précédemment évoquées.

Les géomembranes polymères et bitumineuses jouent le rôle essentiel de barrière faiblement perméable et stoppant les fuites, assurant l'étanchéité pour éviter tout transfert liquide d'un point à un autre. Ces géomembranes conservent leurs propriétés étanches même sous déformation à l'utilisation, et présentent une adhérence résistante et durable. Une autre catégorie de barrière imperméable est constituée par les revêtements argile-géosynthétique (RAG) : en général une couche de bentonite entre deux couches de géotextile pour la stabilisation. Les RAG n'assurent pas une adhérence résistante permanente des couches, et n'ont jamais été utilisés dans les barrages : ils ne sont pas abordés dans ce Bulletin.

De manière cohérente avec les pratiques habituelles de l'ingénierie, le terme « géomembrane » est utilisé ici principalement pour les géomembranes polymères et pour les géomembranes bitumineuses. Les géomembranes sont constituées de feuilles continues relativement minces fabriquées généralement en usine, mais peuvent également être fabriquées sur site grâce à l'imprégnation de géotextiles avec du bitume ou des élastomères. Les géomembranes polymères ont été mises en œuvre dans 240 barrages, parmi lesquels 9 géomembranes ont été fabriquées sur place par imprégnation, les géomembranes bitumineuses dans 23 barrages parmi lesquels 3 géomembranes ont été fabriquées sur place par imprégnation. La dernière mise en œuvre d'un géotextile imprégné de bitume sur site a eu lieu en 1988 à Humenize (CZ). En général, cette technologie n'a pas apportée de résultats satisfaisants et elle est abandonnée aujourd'hui.

En 1990, le Bulletin 78 CIGB présentait sommairement les géomembranes, les géotextiles imprégnés et les revêtements pulvérisés à base de polyuréthane et de résines polypropylènes, produites sur place au lieu d'être fabriquées en usine. Ce type de produit doit présenter une épaisseur constante et une adhérence parfaite au support, ce qui demande une préparation de surface exigeante. Sa mise en place demande des conditions météorologiques qui sont rarement présentes en permanence sur un chantier. C'est l'une des raisons des défaillances provoquées par ce type de membrane. Semblables à la famille des résines utilisées comme revêtement, et de moins en moins utilisées, ces membranes ne sont pas abordées dans ce Bulletin.

1.3. CONTENU DU BULLETIN

Le Bulletin comprend les chapitres suivants :

Le chapitre 1 présente de manière succincte les géosynthétiques et leur classification en familles distinctes, et leur domaine d'application général. Il résume le contexte et le domaine d'application de ce Bulletin.

Le chapitre 2 décrit la classification et les caractéristiques des géomembranes ; il s'intéresse également aux spécifications et aux tests des matériaux.

Le chapitre 3 décrit les charges et contraintes auxquelles sont exposées les géomembranes, les critères et recommandations pour la conception, la construction et l'exploitation.

Le chapitre 4 traite des applications des géomembranes comme dispositif d'étanchéité pour la construction de nouveaux barrages en remblai. Il présente également les applications des géomembranes pour la réparation de masques d'étanchéité en béton bitumineux, de masques à base de géomembranes bitumineuses, et des parements béton dans les barrages en enrochements.

Le chapitre 5 s'intéresse aux applications des géomembranes pour réparer les parements en béton, béton projeté et maçonnerie des barrages poids et barrages voûtes. Il traite des réparations à sec et sous l'eau.

Le chapitre 6 traite les applications des géomembranes aux barrages BCR comme masque d'étanchéité amont dans les nouvelles constructions, et pour la réparation des barrages existants.

Le chapitre 7 aborde les applications spécifiques : comme élément d'étanchéité sur les joints ou fissures, et pour les réparations immergées.

Le chapitre 8 traite de l'assurance qualité.

Le chapitre 9 donne enfin des recommandations de spécifications pour la conception, l'acquisition et la construction de dispositifs d'étanchéité par géomembranes.

L'annexe 1 présente une base de données pour les 250 barrages pour lesquels des géomembranes ont été mises en œuvre. Les statistiques ont été arrêtées au 31 décembre 2006. Cette annexe ainsi que la base de données mise à jour sont disponibles à la CIGB.

L'annexe 2 contient une liste de termes et définitions techniques concernant les géomembranes.

L'annexe 3 contient les principales références pour les normes d'essais et pour l'utilisation des géomembranes et de leur mise en œuvre sur différents barrages.

Comme de nombreuses informations concernent différents types de barrage, elles ne sont présentées qu'une fois pour ne pas trop augmenter le volume du Bulletin. C'est pourquoi les différents chapitres de celui-ci ne peuvent être utilisés comme des documents indépendants, mais doivent être lus en relation avec les autres parties.

2. MATÉRIAUX, ESSAIS, VIEILLISSEMENT

2.1. LES MATÉRIAUX

Les géomembranes mentionnées dans ce Bulletin (plus de 260 barrages) sont constituées de polymères synthétiques (plus de 91 %) et de bitume (plus de 8 %). Cette section vise à offrir (a) une appréciation sur le grand volume d'informations disponibles, (b) une connaissance de base des géomembranes, et (c) une liste des essais disponibles pour évaluer les caractéristiques et le comportement des géomembranes.

2.1.1. Géomembranes polymères

Cette section n'aborde que les géomembranes polymères qui ont été mises en œuvre sur 240 barrages.

Les géomembranes polymères consistent en une ou plusieurs couches de matériaux polymères, fabriqués en usine selon un des trois processus suivants : calendrage, extrusion et enduction par pulvérisation.

2.1.1.1. Classification

Un matériau polymère consiste en plusieurs unités (monomères) liées les unes aux autres. Un monomère est un composé moléculaire utilisé pour produire le polymère. Des longueurs ou types différents de chaînes polymères conduisent à des matériaux présentant des caractéristiques distinctes.

Les polymères les plus courants utilisés comme produits de base pour la fabrication de géomembranes se répartissent en trois types :

I. – Les thermoplastiques : ils peuvent être chauffés plusieurs fois jusqu'à leur point de fluidité, mis en forme et transformés selon les besoins, et refroidis pour conserver la forme obtenue.

Tableau 3
Matériaux synthétiques les plus souvent employés comme geomembranes

Type	Matériau de base	Abréviation
Thermoplastique	Polyéthylène chloré	CM
	Copolymère d'éthylène vinyle acétate	EVM
	Polyéthylène	PE*
	Polypropylène	PP
	Polychlorure de vinyle	PVC
Caoutchoucs thermoplastiques	Polyéthylène chlorosulfoné	CSM
	Copolymère d'éthylène-propylène	EPM
Thermodurcissable	Polyisobutylène	PIB
	Polychloroprène	CR
	Monomère d'éthylène-propylène-diène	EPDM
	Caoutchouc isobutène-isoprène	IIR
	Caoutchouc butadiène-nitrile acrylique	NBR

* Dans le groupe présenté, le polyéthylène et le polypropylène sont appelés collectivement polyoléfines.

II. – Les caoutchoucs thermoplastiques : matériaux de transition (mélanges) pouvant être soudés par chauffage initialement, mais qui réticulent avec le vieillissement, se transforment en thermodurcissables, et doivent donc recevoir des rustines adhésives si des perforations se produisent.

III. – Thermodurcissables : le processus de chauffage ne peut pas être répété. Tout chauffage postérieur à la première mise en forme conduit à une dégradation, voire une carbonisation du matériau.

Suivant la densité le polyéthylène (PE) peut être plus rigide (PE haute densité, abrégé en PEHD) ou moins rigide à différents niveaux (classé désormais dans un seul groupe sous le nom de PE linéaire à basse densité, abrégé en PELBD).

Le tableau suivant fait la liste des différents types de géomembranes installées sur des barrages. Les géomembranes bitumineuses, et les membranes fabriquées sur place, ont été incluses pour fournir une vue d'ensemble complète.

Tableau 4 - Géomembrane dans les barrages

Type de géomembrane	Matériau de base	Abréviation	Nombre total de barrages				%
			Exposées	Couvertes	Inconnues	TOTAL	
Polymère	Polychlorure de vinyle - Plastifié	PVC-P	80	73	3	156	59.32
Polymère	Polyoléfine	PELBD*	0	29	1	30	11.41
Polymère	Polyoléfine	PEHD	3	12	1	16	6.08
Polymère	Caoutchouc isobutène-isoprène, Polyisobutylène, Monomère d'éthylène-propylène-diène	IIR, PIB, EPDM	5	4	2	11	4.18
Polymère	Polyéthylène chlorosulfoné	CSM	3	5	1	8	3.42
Polymère	Géotextiles imprégnés de polymères	Membrane fabriquée sur place	2	7	0	9	3.42
Polymère	Polyoléfine	PP	3	3	0	6	2.28
Polymère	Polyéthylène chloré	CM	0	3	0	3	1.14
Bitumineux	Bitume oxydé	Géomembrane préfabriquée	7	10	0	17	6.47
Bitumineux	Bitume polymère	Bitume polymère	0	3	0	3	1.14
Bitumineux	Bitume oxydé	Membrane fabriquée sur place	3	0	0	3	1.14
Sous-total polymères						240	91.25
Sous-total bitumineux						23	8.75
Total connu						263	100.00

*Les PELBD comprennent tous les types de géomembranes flexibles PE ayant une densité inférieure au PEHD.

La cristallinité est importante, parfois essentielle, dans le comportement des géosynthétiques polymères. On peut montrer qu'une cristallinité croissante provoque les phénomènes suivants :

Tableau 5
Effets d'une cristallinité croissante

Une cristallinité croissante augmente Rigidité ou dureté Résistance à la chaleur Résistance à la traction Module Résistance chimique	Une cristallinité croissante diminue Transmission de vapeur Élongation ou déformation à la rupture Flexibilité Résistance à l'impact Résistance aux fissures sous contrainte (PEHD seulement)
---	---

Le taux de cristallinité entraîne une classification plus poussée des polymères qui n'entre pas dans le cadre de ce Bulletin. De manière générale, les géomembranes de cristallinité basse, de type PVC et EIA (Ethylene Interpolymer Alloy) sont plus souples et peuvent se plier lorsqu'elles sont chauffées, sans changement substantiel de leurs propriétés, et une fois refroidies, reprennent leurs caractéristiques initiales : elles peuvent donc être facilement soudées par chauffage, extrusion ou méthodes chimiques. Le PVC est plus précisément appelé PVC-P (plastifié). Dans le cadre de ce Bulletin, les deux appellations (PVC et PVC-P) sont admises.

Les géomembranes de cristallinité supérieure de type PE et PP (appelé plus précisément fPP, PP flexible), sont plus difficiles à souder.

2.1.1.2. Composition

Aucun matériau géosynthétique n'est constitué que de résines polymères. Dans tous les cas, la résine de base est mélangée avec des additifs, des charges, des additifs d'extrusion et/ou d'autres agents à buts multiples. La quantité totale de résine polymère dans une formulation donnée peut largement varier, d'un minimum de 50 % à pratiquement 97 %.

Les additifs les plus fréquents sont les suivants :

- *Le noir de carbone* utilisé comme stabilisant contre le rayonnement ultraviolet, utilisé le plus souvent dans les polyoléfines, essentiellement dans le polyéthylène (PE) à hauteur de 2 à 3 %. Une détérioration des PE a été observée dans les régions à fort rayonnement solaire, celle-ci étant d'autant plus élevée que la feuille est mince. Des épaisseurs plus importantes permettent d'éviter les problèmes : zones de soudure, usure, pertes de propriétés mécaniques et perforations.
- *Des plastifiants* utilisés principalement dans la fabrication des PVC pour plus de flexibilité. La disparition de ces plastifiants par extraction ou par migration provoquées par le rayonnement solaire ou par le simple contact avec l'eau, entraîne une dégradation progressive de la géomembrane. L'épaisseur joue également un rôle dans ce domaine.

- *Les absorbeurs de lumière ultraviolette* jouent un rôle important dans la formulation de ces matériaux. Le processus de vieillissement accélérerait notablement en leur absence. La dégradation se concrétise par un changement de couleur.
- *Les antioxydants (AO)* sont de deux sortes, avec des objectifs différents : protection contre les températures élevées lors du processus d'extrusion, et protection contre les basses températures pour éviter la dégradation des polymères. Le polymère ne vieillit pas aussi longtemps que ces AO sont présents, ils ont donc une importance critique.
- *Les autres additifs* comme les pigments ou colorants, les retardateurs de flamme, les biocides, les agents de moussage, les lubrifiants, les charges, les stabilisateurs thermiques et les agents antistatiques sont ajoutés en général à la résine.

Aujourd'hui, certains sels de matériaux lourds qui étaient utilisés comme additifs sont remplacés par d'autres produits sans influence néfaste sur l'environnement.

2.1.1.3. Configurations

Les géomembranes polymères utilisées pour l'étanchéité des barrages sont généralement présentées de quatre différentes manières (Fig. 2) :

- *Les géomembranes sans armature ou homogènes*, constituées exclusivement de matériaux polymères et des additifs correspondants.
- *Les géomembranes multicouches*, formées comme leur nom l'indique d'une série de couches soit du même matériau, soit de matériaux différents. Cette procédure est utilisée principalement pour réduire le coût des géomembranes ou pour améliorer certaines de leurs propriétés. Par exemple, la couche externe, qui présente théoriquement une plus grande quantité d'additifs pour la protection contre les UV, va améliorer la résistance aux UV. Par contre, des dommages à la couche externe peuvent alors mettre à jour des couches internes plus sensibles aux UV. C'est pour cette raison qu'on peut parfois préférer une géomembrane monocouche de plus grande épaisseur.
- *Les géomembranes renforcées par une grille*, lorsque le polymère présente des inserts de matériaux polymérique de type fibres de verre, fils synthétiques – la plupart du temps des fils, voiles ou tissus polyesters. L'objectif des fibres synthétiques est d'améliorer les propriétés mécaniques ; toutes les fibres peuvent accroître de manière significative la stabilité dimensionnelle de la géomembrane. Suivant le type de renforcement utilisé, on peut améliorer une propriété donnée pour une utilisation particulière. Le renforcement le plus courant est une grille PET.
- *Les géomembranes sur support de renforcement*, lorsque la géomembrane est doublée de tissus ou d'autres renforcements. Un géotextile de renfort peut :
 - donner une certaine stabilité au composé pendant le processus de fabrication ;
 - accroître la résistance et le module à la traction, au déchirement, à l'éclatement et au poinçonnement de la géomembrane ;
 - conférer ou améliorer la stabilité dimensionnelle de géomembranes qui rétréciraient ou se dilateraient sous l'influence de la température.

Les renforcements les plus utilisés sont en polyester, en polypropylène, en polyamide ou en verre. Les géomembranes renforcées par un tissu présentent une déformation réduite à la rupture.

De plus, un géotextile utilisé en combinaison avec une géomembrane, comme couche de renfort sur une face ou sur les deux, apporte les bénéfices additionnels suivants :

- il joue le rôle de matériau drainant, car ses caractéristiques de transmittivité dans le plan permettent d'éviter que l'eau ou les gaz n'entrent en contact direct avec la géomembrane ;
- il augmente le frottement pour éviter le glissement ;
- il améliore la répartition de contrainte sous la géomembrane, en la protégeant des dommages mécaniques (par ex. le poinçonnement par la surface de support.



Fig. 2
Configurations des géomembranes polymères

La description détaillée des processus de fabrication des géomembranes n'entre pas dans le cadre de ce Bulletin, et peut être trouvée dans la littérature.

Par définition, et en raison des méthodes de fabrication habituelles, les géomembranes ont des faces planes lisses. Pour de nombreuses applications, il est préférable d'avoir un coefficient de frottement supérieur sur l'une ou les deux faces de la géomembrane. Cet accroissement de frottement peut être obtenu en laminant un géotextile sur la géomembrane (géomembrane doublée, appelée « géocomposite ») ou en créant une surface texturée sur la feuille normalement lisse. Le second procédé est appelé « texturation ».

2.1.1.4. *Forme de la fourniture*

L'épaisseur d'une géomembrane polymère non doublée varie entre 1,0 et 4,0 mm, et sa masse surfacique, suivant la composition, entre 0,9 et 4,5 kg/m².

Les géomembranes sont fabriquées en lés d'épaisseur et d'uniformité contrôlées. Leur largeur standard se situe entre 2 et 6 m (jusqu'à 11 m pour le PEHD, le PELBD et le fPP). Les lés ont en général une longueur leur permettant de couvrir la hauteur du parement amont du barrage depuis la crête jusqu'au pied pour éviter les soudures transversales. Les géomembranes sont en général fournies en rouleaux ou pliées en accordéon. La mise en place de la géomembrane sur le support s'effectue en déroulant le lé, puis en soudant les lés adjacents suivant une technique appropriée au matériau employé.

Les matériaux non-rigides (comme le PVC-P) peuvent être fournis sous la forme de nappes pré-assemblées pour obtenir une surface unitaire plus grande, en soudant les lés en usine ou bien sur site. La plupart du temps les lés standard sont soudés ensemble pour former des nappes de 4 à 6 m de largeur.

Des largeurs plus importantes de rouleaux permettent de réduire le nombre total de soudures, mais le poids et la taille qui en découlent peuvent provoquer de sérieuses difficultés au moment de les dérouler sur la face amont du barrage, car il sera difficile d'éviter plis ou rides néfastes.

2.1.2. Géomembranes bitumineuses

Cette section traite des géomembranes bitumineuses (20 barrages, correspondant à moins de 8 % de l'ensemble des barrages) et des membranes imprégnées de bitume sur site (3 cas). Les géomembranes bitumineuses sont utilisées principalement pour des barrages en remblai en France.

2.1.2.1. Principe et composition

Les géomembranes bitumineuses sont produites en usine par imprégnation et revêtement d'un géotextile non-tissé aiguilleté par un matériau bitumineux chauffé et fluide. Ce géotextile sert à la fois de support pour la fabrication et de renforcement. La géomembrane peut également avoir un renforcement sous forme de grille fibre de verre.

Deux types de bitumes modifiés sont fréquemment utilisés :

- Le bitume oxydé ;
- Des bitumes modifiés par l'addition de polymères (en général du styrène butadiène styrène, SBS). Ces matériaux acquièrent alors le même comportement que celui du polymère incorporé (notamment la viscoélasticité).

Des fines minérales sont ajoutées comme charge.

2.1.2.2. Configuration

Les géomembranes bitumineuses utilisées dans les barrages ont une grille de fibre de verre comme renforcement secondaire.

L'une des faces est couverte par un film pour éviter la pénétration des racines, et l'autre présente une fine couche de sable ; la face portant le film présente une zone de soudage protégée par une bande de papier pouvant être facilement enlevée avant de souder les rouleaux.

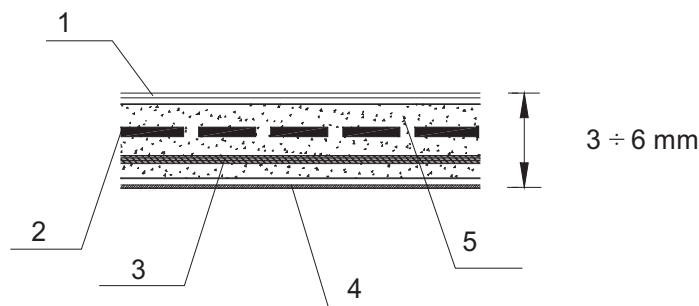


Fig. 3

Configuration d'une géomembrane bitumineuse

1. Face sablée
2. Géotextile non tissé aiguilleté, imprégné et revêtu de bitume
3. Éventuellement fibre de verre
4. Film anti-racines
5. Masse bitumineuse

2.1.2.3. Forme de la fourniture

L'épaisseur varie entre 3,0 et 6,0 mm et la masse entre 3,5 à 8 kg/m². Les lés peuvent être fabriqués en version lisse ou texturée. Les largeurs disponibles vont de 2 à 5,5 m.

2.1.3. Composition des géomembranes et eau potable

Quoi que l'on dise souvent, il est incorrect de qualifier de « potable » l'eau stockée dans un réservoir. Dans les réservoirs de barrages elle est soumise aux aléas environnementaux, à l'impact de la faune (notamment des oiseaux), de la flore, à la formation d'algues, à la contamination par les pluies acides, au dépôt de sédiments dans le bassin, aux débits entrants etc. C'est pourquoi l'eau d'un réservoir ne peut être considérée comme potable car elle nécessite toujours un traitement supplémentaire en aval avant d'alimenter le système de distribution et d'être utilisée pour la consommation humaine.

La plupart des géomembranes contiennent des additifs indispensables pour leur conférer des caractéristiques essentielles de flexibilité, de stabilité thermique, de résistance aux UV, de durée de vie, etc. La plupart de ces substances sont compatibles avec le contact des eaux potables traitées (du type de celles pouvant être vendues en bouteilles de plastique) ; d'autres ne le sont pas, comme certains biocides ou certains absorbeurs d'UV. L'une des exigences s'appliquant aux géomembranes, avant le traitement ultérieur de l'eau, peut consister à exclure de leur composition ces substances jouant un rôle dans la qualité d'ensemble et les performances de la géomembrane. En général, les géomembranes mises en œuvre dans les barrages destinés à l'alimentation en eau ne doivent pas contenir de substances de type métaux lourds pouvant affecter la santé humaine. Le pourcentage de composants pouvant être diffusés par une géomembrane doit être évalué en fonction de la surface de géomembrane sur le parement du barrage par rapport au volume d'eau stocké dans le réservoir, à la durée de rétention et au type de traitement que l'eau subira en aval.

L'influence d'une géomembrane recouvrant le parement amont d'un barrage pour un réservoir de 100 000 000 m³ d'eau est négligeable en comparaison de celle d'une bouteille plastique contenant de l'eau potable traitée. Cette considération est essentielle lorsque que l'on détermine la liste de géomembranes qui peuvent être autorisées en toute sécurité.

Les mêmes exigences sur les composants s'appliquent aux géomembranes protégées, car le revêtement qui les recouvre ne les isole pas du contact avec l'eau. Ceci vaut également pour les géosynthétiques placés au dessus de la géomembrane.

En conclusion, il faut bien comprendre qu'une géomembrane adaptée à une mise en œuvre sur un barrage dont le réservoir contient de l'eau destinée à être traitée en aval pour la consommation humaine ou l'irrigation, peut présenter des caractéristiques différentes (résistance aux UV, durée de vie, etc.) de celles d'une géomembrane utilisée pour le revêtement d'un réservoir souterrain stockant de l'eau potable traitée.

Une eau en provenance de réservoirs – dont les parements de barrages avaient été équipés de plusieurs géomembranes polymères résistantes aux intempéries – a réussi tous les tests de qualité après traitement dans des stations de purification de type courant, ce qui montre que les géomembranes n'ont pas affecté la qualité de l'eau.

2.1.4. Soudures

Le soudage des rouleaux ou panneaux de géomembranes constitue un aspect essentiel pour le succès de leur mise en œuvre comme barrière imperméable. Suivant le type d'ancrage de la géomembrane, les soudures peuvent être soumises à des contraintes mécaniques. Dans ce cas, il est important de les tester en traction et en cisaillement.

Les joints des lés, permettant d'obtenir une continuité de la structure imperméable, peuvent être réalisés par différentes méthodes, dépendantes de la nature et de la classe de matériau. Le mécanisme fondamental consistant à réorganiser la structure polymère des deux surfaces opposées à joindre (par fonte sous l'effet de la chaleur, ou par ramollissement à l'aide de substances chimiques) permet de lier les deux feuilles de manière contrôlée. Lors de ces processus, il est possible d'ajouter du polymère dans la zone de soudure (soudure extrudée).

Les méthodes de soudage des géomembranes les plus courantes sont présentées dans le Tableau 6 et schématisées dans la Fig. 4.

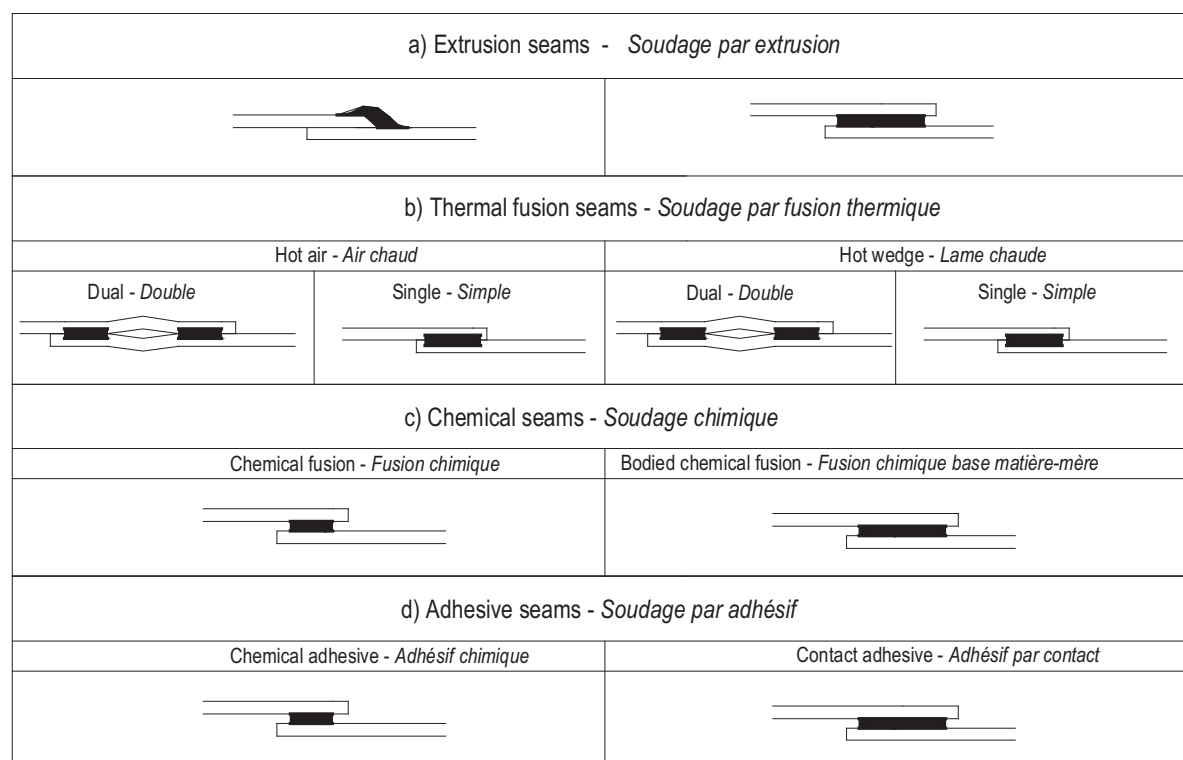


Fig. 4
Méthodes de soudage

Dans l'absolu, le soudage de deux lés de géomembranes ne doit pas entraîner de perte nette d'étanchéité et de résistance à la traction à travers les deux lés, et les lés raccordés doivent se comporter comme un seul lé. Les caractéristiques de la zone soudée dépendent du type de géomembrane et de la technique de soudage utilisée. Différents facteurs, comme la résistance résiduelle, le type de géomembrane et la méthode de soudage doivent être connus du bureau d'études pour utiliser à la conception les paramètres de sûreté s'appliquant à la fonction et à la performance de l'ensemble de la géomembrane.

2.1.4.1. Géomembranes polymères

Le soudage par *fusion thermique* est la méthode la plus couramment utilisée pour toutes les géomembranes thermoplastiques. Il existe deux méthodes de fusion thermique ou de liaison par fusion, la méthode par lame chaude ou par air chaud. Dans les deux cas, les surfaces opposées sont complètement fondues. La méthode par *lame chaude* consiste à faire passer une lame chauffée par résistance électrique entre les

deux lés à souder. Après fusion de la surface des deux lés, une pression est appliquée par une roulette. Les machines à lame chaude sont automatisées en termes de température, pression appliquées et vitesse d'avancement. Une lame chaude standard crée une soudure unique uniforme, alors qu'une lame chaude double (ou séparée) forme deux soudures parallèles séparées par un espace non soudé entre les deux, appelé généralement *canal*. Cet espace peut être utilisé pour évaluer la qualité et la continuité de la soudure en injectant de l'air sous pression dans l'espace non soudé, et en vérifiant qu'il n'y a pas de baisse de pression autre que celle due à la déformation de la géomembrane (augmentation du volume du canal). La largeur courante d'une soudure est de 2 fois 15 mm soudés, séparés par un canal de 10 mm.

La méthode à *l'air chaud* met en œuvre un appareil consistant en une résistance chauffante, un ventilateur, et un thermostat qui permet de souffler de l'air chaud entre les deux lés pour faire fondre les deux surfaces opposées. Immédiatement après la fusion, un rouleau applique une pression. Comme pour la méthode par lame chaude, des soudures simples ou doubles peuvent être effectuées puis testées. La largeur courante d'une soudure simple est 1x30 mm. Dans certains cas, cette technique est utilisée pour présouder temporairement deux lés, avant que la soudure finale ne soit effectuée et acceptée.

Les Fig. 5 à 8 illustrent le test de soudures simples et doubles par fusion thermique.



Fig. 5 à 8

Contrôle d'une soudure simple selon les normes ASTM (méthode à la pointe métallique, cloche à vide, lance à air) et d'une soudure double à l'air comprimé (norme GRI GM 6)

Le PVC, le PP, le PEHD et le PELBD sont soudés thermiquement.

Actuellement, la soudure par *extrusion* est utilisée exclusivement sur les géomembranes PEHD, PELBD et fPP. Un ruban de polymère fondu est extrudé au bord ou entre les deux surfaces légèrement texturées à souder. La chaleur du

matériau extrudé est transférée aux lés qui se mettent à fondre, puis l'ensemble de la masse refroidit et fait bloc. Cette technique est appelée *soudure par cordon d'extrusion ou soudure plate par extrusion*, suivant la position du matériau extrudé. La soudure par cordon d'extrusion est pratiquement la seule méthode pour souder les rustines de géomembranes PE. La température et la vitesse de soudage jouent conjointement un rôle important pour obtenir une liaison acceptable. Une fusion trop importante fragilise la géomembrane, tandis qu'une fusion insuffisante ne permet pas un flux adéquat de matériau extrudé à l'interface, et entraîne donc une résistance de soudure médiocre. Le soudage plat par extrusion est rarement mis en œuvre aujourd'hui depuis que le soudage par lame chaude a été amélioré.

Les *adhésifs* sont des agents de liaison appliqués sur les deux surfaces à joindre. Après avoir atteint un niveau d'adhésivité suffisant, les deux lés sont placés en regard l'un de l'autre, et une pression par roulette est appliquée. Ce type de soudure s'applique aux matériaux thermodurcissables du type EPDM.

La *fusion chimique* met en œuvre un solvant chimique (en général MEK, méthyle éthyle cétone), appliquée entre les deux lés à souder. A la suite d'un pré-lavage, ce liquide visqueux est appliqué entre les deux surfaces opposées à souder. Après quelques secondes pour laisser les surfaces ramollir, une pression est exercée pour parfaire le contact et souder les lés l'un à l'autre. Un excès de solvant fragilise les lés, alors qu'un défaut risque de rendre médiocre la soudure. Celle-ci doit toujours être effectuée en suivant les recommandations du fabricant, ou en se conformant aux exigences du matériau, si une norme pertinente existe. Cette méthode est utilisée pour le soudage sur site des CSM.

Tableau 6
Méthodes potentielles de soudage sur site pour différents types de géomembranes*

Méthode de soudure	Polymères						Bitum.
	PVC-P (plastifié)	PELBD	PEHD	fPP	Élastomère	CSM	
Fusion thermique (air chaud et lame chaude)	A	A	A	A	A	A	A
Extrusion (cordon et à plat)	N/A	A	A	A	N/A	N/A	N/A
Adhésif	A	N/A	N/A	N/A	A	A	A
Fusion chimique	A	N/A	N/A	N/A	N/A	A	N/A

*A = méthode applicable ; N/A = méthode non applicable

2.1.4.2. Géomembranes bitumineuses

La soudure des lés adjacents est effectuée par soudure simple sur une largeur comprise entre 12 et 20 cm.

La face portant le film des géomembranes bitumineuses présente une zone de soudage protégée par une bande de papier pouvant être facilement enlevée avant de souder les lés. Les lés sont soudés à l'aide d'un brûleur propane, permettant la fusion des deux surfaces. Une pression doit alors être exercée sur l'assemblage pour

garantir un résultat correct. Les soudures des géomembranes bitumineuses sont étanches, mais peuvent parfois manquer de résistance à la traction et à la déchirure. En raison du risque de fluage aux soudures, il n'est pas autorisé de les effectuer perpendiculairement à la pente, ce qui demande la préparation de rouleaux spéciaux, qui peuvent être plus longs que d'habitude, pour le site concerné.

Comme pour toutes les géomembranes, l'assemblage ne doit pas être effectué dans des conditions météorologiques adverses, pluie, vents forts, neige ou températures excessives (supérieures à 35 °C ou inférieures à + 5 °C).

2.1.5. Comportement comparatif des géomembranes

Les caractéristiques de la géomembrane, élément essentiel du dispositif d'étanchéité, doivent être choisies pour une résistance à toutes les charges possibles pendant l'installation et l'exploitation, et pour garantir son étanchéité pour une période de plusieurs décennies.

Bien qu'il n'y ait pas de règles déterminées concernant la durée de vie nécessaire des géomembranes dans les barrages, il va sans dire que celle des géomembranes protégées sera bien supérieure à celle des géomembranes exposées. Il semble raisonnable d'espérer d'une géomembrane protégée par une couche permanente de béton une durée de vie supérieure à 200 ans. Des études scientifiques prévoient pour une géomembrane enterrée constituée des matériaux les plus courants (PVC, PE) une durée de vie supérieure à 950 ans.

Certaines géomembranes exposées en PVC sur des barrages approchent actuellement les 30 ans de service sans avoir besoin d'être remplacées. On peut attendre des géomembranes PVC produites à l'heure actuelle, avec une meilleure connaissance des problèmes, une qualité améliorée des composants, des usines et contrôles qualité plus sophistiqués et une épaisseur accrue, une durée de vie pouvant excéder facilement 100 ans. En Allemagne, parfois la durée de vie exigée des géomembranes exposées sur les barrages est de 40 ans. Dans le cas d'une géomembrane exposée, la durée de vie exigée peut être inférieure car, accessible, elle peut plus facilement être remplacée. De plus, le coût de remplacement d'une géomembrane exposée peut être parfois inférieur de plusieurs ordres de grandeur à celui d'une couche de protection.

Le Tableau 7 qui suit présente une comparaison des caractéristiques principales de certaines géomembranes polymères et bitumineuses. Le fPP a été inclus, malgré le peu d'exemples mentionnés, car il fait partie des matériaux les plus récents utilisés pour l'étanchéité des barrages.

2.1.6. Géotextiles et produits connexes

Le Bulletin CIGB n° 55, Géotextiles, filtres et transitions pour barrages en remblai, fournit des informations supplémentaires sur les géotextiles et produits connexes.

En ce qui concerne les géofiletts (Fig. 9 à 11), ils consistent en rubans polymères PEHD qui se croisent et sont soudés les uns aux autres pour former un filet stable avec de grandes ouvertures et une bonne transmissivité. La composition du matériau brut doit être vérifiée, pour s'assurer que pendant la durée de vie, les

Tableau 7
Comportement comparatif des géomembranes

ASPECT	Géomembranes polymères					Géomembranes bitumineuses
	PVC-P (plastifié)	PELBD	PEHD	fPP	EPDM	
Soudure de lés						
• Méthode normale de soudure	Soudure thermique • Auto-matique, air chaud ou lame chaude • Manuelle, air chaud, solvant, matière-mère solvantée	Soudure thermique • Auto-matique, lame chaude, air chaud possible • Manuelle : extrusion	Soudure thermique • Auto-matique, lame chaude, air chaud possible • Manuelle : extrusion	Soudure thermique • Auto-matique, lame chaude • Manuelle ; air chaud (extrusion possible)	• En usine : vulcanisation ou bande adhésive • Sur site : collage ou bande adhésive	Soudure thermique : Brûleur propane (fusion partielle)
• Temps nécessaire avant d'exercer une contrainte mécanique	Pratiquement instantané. Pour les solvants, 3 à 8 jours	Pratiquement instantané	Pratiquement instantané	Pratiquement instantané	Plusieurs jours de séchage	Un certain temps de refroidissement (une à quelques heures)
• Soudure double possible pour le contrôle de continuité par air comprimé (ou eau)	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non
• Contrôle des soudures (nouveaux produits)	Très bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Moyenne	Très bonne
• Possibilité de réparation (soudure des produits vieillissants)	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Moyenne	Facile à moyenne, suivant le degré de vieillissement
Comportement mécanique de la géomembrane						
• Sous contrainte de traction constante • Sous déformation imposée en traction	Pas de fluage	C'est surtout pour le PEHD, pour une contrainte supérieure à la limite d'élasticité, qu'une déformation importante partiellement irréversible (fluage) apparaît après que la contrainte ait cessé			• Élongation pratiquement constante, fonction de la contrainte (pas de fluage)	• Pas de fluage sur la feuille mère avec renforcement • Fluage possible près des soudures (solution de continuité du renforcement)
	Relaxation variable de contrainte, dépendant du matériau et du type de contrainte				• Faible relaxation de la contrainte	• Sur la feuille mère bonne relaxation du liant • Sur les soudures : très bonne récupération de contrainte

Tableau 7 (suite)

ASPECT	Géomembranes polymères					Géomembranes bitumineuses
	PVC-P (plastifié)	PELBD	PEHD	fPP	EPDM	
• Sous cisaillement (dans la géomembrane ou dans les soudures)	Très bon					• Bon (modérée à température élevée des soudures)
Flexibilité à basse température (0°C) facilité de placement dans les coins	Bonne	Moyenne	Médiocre	Moyenne	Excellente	Moyenne à bonne
Facilité de raccords aux ouvrages :						
• Dans le béton hydraulique	Bonne (profilés métalliques et soudure sur profilés plastiques)	Assez bonne (profilés métalliques et soudure sur profilés plastiques)			Bonne (profilés métalliques et collage au support possible)	Bonne, soudure facile sur le support, renforcement par profil métallique
• Dans le béton bitumineux	Bonne	À vérifier				Très bonne
Comportement physique à haute température (30°C ambiante) sans protection - déformations - ramollissement (pouvant entraîner des déchirures ou des poinçonnements)						
• À la mise en place	Moyen à bon suivant la présence de géotextile de renfort	Médiocre (plis)	Médiocre (plis)	Moyen (soudure automatique difficile)	Très bon	Bon
• En exploitation	Bon à excellent si ancré avec système de tensionnement	Bon	Moyen	Bon	Bon	Bon : ramollissement possible du matériau
Durabilité						
Vieillessement aux intempéries pour des géomembranes non renforcées	De très bon à médiocre suivant les plastifiants	A vérifier	Bon	Bon (à confirmer)	Bon	Médiocre à bon (suivant le produit)
Comportement dans l'eau salée, acide ou basique	Très bon					
Sensibilité au gel et au dégel	Bonne					Médiocre
Sensibilité aux conditions climatiques pendant l'installation	Bonne (les matériaux peuvent être humides mais la zone de soudure doit être sèche)				Importante (les matériaux doivent être propres et secs)	Moyenne (mais la zone de soudure doit être sèche)
Étanchéité (géomembranes et soudures)	Très bonne					
Coefficient de frottement	Moyen à élevé **	Moyen à élevé **	Faible à élevé*	A priori moyen, mais insuffisamment connu	Moyen	Moyen à bon *

* Suivant la nature physique de la surface considérée (lisse, granulaire ou fines minérales).

** Suivant la nature physique de la surface considérée (lisse ou texturée ou renforcée d'un géotextile).

caractéristiques physico-mécaniques ne seront pas trop altérées, notamment en ce qui concerne la transmissivité.

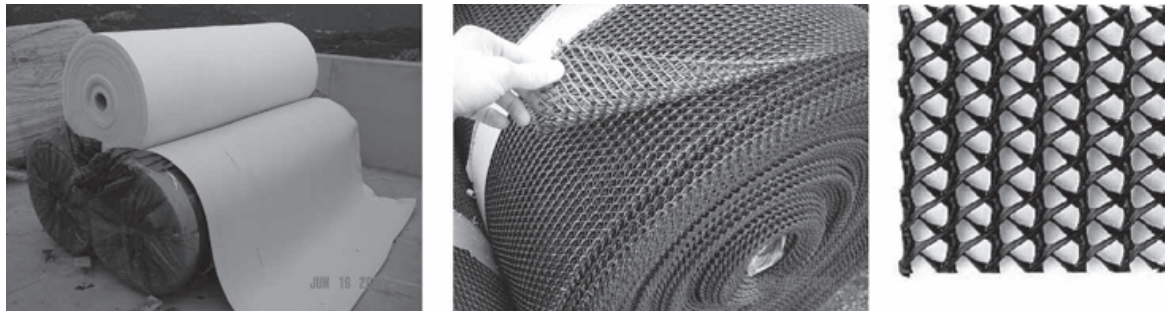


Fig. 9 à 11
Géotextile et géofilet

2.2. ESSAIS DE GEOMEMBRANES

2.2.1. Type d'essais suivant les fonctions

Les essais de géomembranes, destinés à vérifier leurs caractéristiques physiques, mécaniques et de résistance aux intempéries, peuvent être répartis en quatre catégories :

- *Contrôle de qualité pendant la fabrication* : effectués par le fabricant dans ses usines, sur les processus et sur les produits finis. Le type et la fréquence des essais dépendent des procédures internes de contrôle de qualité par le fabricant.
- *Essais d'identification* : effectués par le fabricant en usine, et reportés sur le certificat de la géomembrane qui identifie avec précision le produit lui-même. Les essais d'identification n'apportent pas d'informations suffisantes pour accepter ou rejeter une géomembrane pour une contrainte ou résistance spécifique, car les échantillons d'essais sont trop réduits pour refléter le comportement à échelle réelle, et la contrainte est mono-axiale.
- *Essais de performance* : il est désormais d'usage que les concepteurs, et donc les documents d'appel d'offre, demandent d'effectuer des essais de performance conjointement avec les essais d'identification. Les effets de performance sont effectués sur des échantillons de grande taille, avec des contraintes multiaxiales.
- *Essais de conformité* : effectué par l'utilisateur final pour vérifier que la géomembrane fournie répond aux spécifications contractuelles. Le type et la fréquence de ces essais sont définis dans les documents contractuels (voir chapitre 9).

De nombreuses méthodes et normes d'essais pour les géomembranes sont disponibles, ou en cours de développement par les organismes de normalisation partout dans le monde. D'autres normes qui sont désormais largement employées sont mentionnées dans ce chapitre. L'annexe 3 du bulletin fait la liste de quelques unes des normes les plus importantes en vigueur au niveau international.

Le Tableau 8 résume les essais les plus importants réalisés couramment.

Tableau 8
Essais de géomembranes

	QC	Identification	Performance	Conformité
Perméabilité à l'eau	X	X		X
Résistance à l'éclatement	X	X	X	X
Résistance au poinçonnement (statique et dynamique)		X	X	X
Résistance au déchirement	X	X	X	X
Résistance à l'impact		X	X	X
Caractéristiques de frottement			X	X
Résistance au pelage de la soudure			X	X
Résistance à la traction de la soudure			X	X
Résistance au milieu. Ces essais évaluent la résistance aux produits chimiques, à l'ozone, aux UV, aux micro-organismes, à la température, le comportement au contact avec l'eau, la compatibilité avec l'eau avant le traitement pour la consommation humaine		X	X	X

2.2.2. Essais d'identification et essais de performance

Les essais d'identification appliquent le même type de contrainte sur différents types de géomembranes. Les essais d'identification sont effectués en général sur de petits échantillons, soumis à un seul type de contrainte. Ils permettent la comparaison du comportement de différentes géomembranes soumises à la même contrainte, mais ne sont pas représentatifs du comportement de la géomembrane soumises à des contraintes multiples caractéristiques des conditions opérationnelles. Si une géomembrane présente de meilleures performances qu'une autre pour le même essai d'identification, la probabilité qu'elle soit plus performante en conditions réelles ne peut pas être évaluée avec une précision suffisante. Les essais d'identification sont utilisés en général pour reconnaître le produit.

Les essais de performance sont effectués sur des échantillons de plus grande taille, et sont conçus de manière à ce que les conditions d'essais et contraintes en laboratoire correspondent autant que possible aux conditions de sollicitations réelles. Les essais de performance en grandeur réelle sont représentatifs du comportement opérationnel et permettent au concepteur de choisir le meilleur produit pour le projet.

2.2.3. Analyse chimique et identification des polymères

Il est important d'identifier le type de polymère dont est composée une géomembrane, car cela va déterminer ses propriétés principales. Pour confirmer le type de résine utilisée, les tests d'analyse chimique les plus utilisés sont : l'analyse thermogravimétrique, la calorimétrie différentielle à balayage, le temps d'induction

oxydatif, l'analyse thermomécanique, l'analyse mécanique dynamique, la spectroscopie infrarouge, la chromophotographie, la détermination du poids moléculaire, le test de l'indice de fluidité à chaud, la détermination de la viscosité intrinsèque et l'analyse de l'extrémité carboxyle.

2.2.4. Propriétés physiques et mécaniques, et méthodes d'essai

Les caractéristiques principales pertinentes sont listées dans le Tableau 10. La présentation qui suit s'intéresse à certaines caractéristiques, dont l'intérêt est pour la plupart évident.

2.2.4.1. Perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau d'une géomembrane doit théoriquement être mesurée sous la forme du coefficient de transmission de la vapeur d'eau. Toutefois, il est assez difficile d'effectuer des tests sur des géomembranes épaisses comme celles utilisées pour les barrages, car les valeurs très faibles sont difficiles à mesurer. C'est pourquoi il est plus pratique d'analyser une géomembrane en termes de permittivité hydraulique K/e (K = perméabilité, e = épaisseur de la géomembrane). La permittivité peut être calculée en mesurant en laboratoire la quantité d'eau passant à travers l'échantillon sous un gradient hydraulique et pour un temps donnés.

La permittivité des géomembranes est de l'ordre de 10^{-12} m/s, bien inférieure à celle des matériaux traditionnels comme le béton. La permittivité peut augmenter si le matériau est étiré pendant son utilisation.

2.2.4.2. Comportement en traction uniaxiale sur des bandes étroites (essai d'identification)

Les différents tests en traction sont effectués sur des échantillons de géomembranes de taille relativement réduite (en général des bandes de 50 mm de large). Lors de ces tests de traction, l'échantillon de géomembrane est soumis à une force uniaxiale. Les résultats sont représentés sous la forme d'une courbe contrainte/déformation (Fig. 12) jusqu'au point de rupture. Les informations apportées par ce test ne suffisent d'ailleurs pas en phase de conception, car toute géomembrane est soumise à une contrainte tridimensionnelle sur site.

La géomembrane CSM-R renforcée par grille présente la résistance la plus élevée, mais peut subir des défaillances soudaines à la rupture de la grille. La résistance ne s'annule pas immédiatement, car la feuille de géomembrane recouvrant la déchirure reste intacte jusqu'à la rupture définitive. La géomembrane PEHD répond de manière particulière en présentant une limite d'élasticité prononcée (à environ 10 %), suivi d'une nette diminution puis d'une accélération de la déformation jusqu'à environ 1 000 % lorsque la rupture survient. La géomembrane PVC répond de manière relativement équilibrée, en se déformant peu à peu sous la contrainte, avant rupture à environ 480 % de déformation. La géomembrane PELBD donne également une réponse en résistance équilibrée, mais inférieure, jusqu'à la rupture à environ 700 % de déformation.

Il est important de noter que la procédure d'essai appliquée a une forte influence sur les résultats, et notamment la forme de l'échantillon et la vitesse de déformation. Du point de vue technique, la contrainte et la déformation à la rupture sont moins importantes que la forme générale de courbe déformation contrainte. Une réponse relativement régulière est préférable.

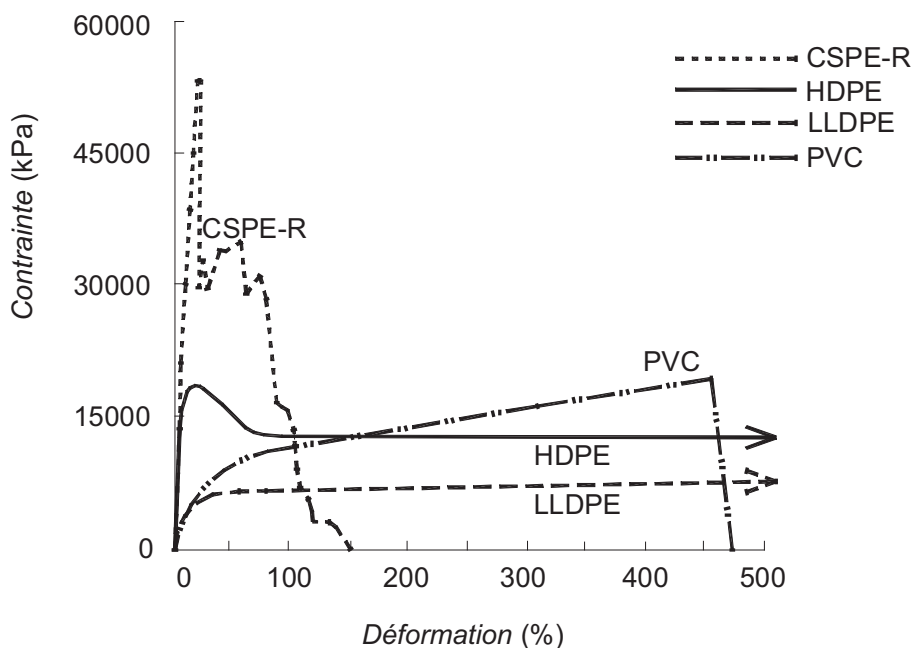


Fig. 12
Comportement déformation contrainte de bandes de différentes géomembranes
(avec l'aimable autorisation de R. M. Kærner)

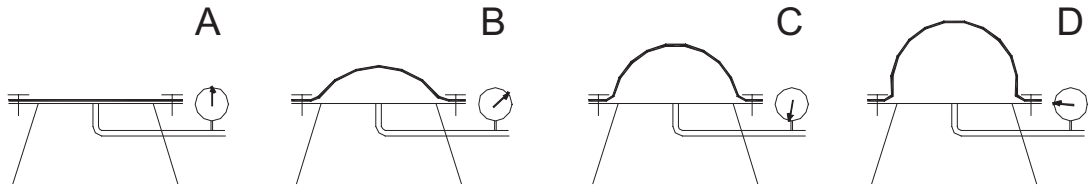
Les essais de fluage pour déterminer l'évolution de la déformation à charge constante, et les essais de relaxation pour réduction de contrainte à déformation constante sont des compléments essentiels à ces essais de tension uniaxiale à déformation contrôlée.

2.2.4.3. Comportement en traction axisymétrique sur des échantillons de grande taille (essai de performance)

Tout revêtement géomembrane est soumis à une contrainte tridimensionnelle sur site. Les essais axisymétriques sont plus intéressants pour la conception que les essais en tension uniaxiale.

Une déformation localisée derrière une géomembrane provoquerait un effet de même type. Ces essais permettent d'anticiper correctement le comportement d'une géomembrane utilisée dans un barrage en remblai et placée sur un matériau de remblai solide avec un soutien différentiel. Cette situation peut être modélisée en plaçant la géomembrane dans un récipient hydraulique et en pompant de l'eau sur la géomembrane (Fig. 13 à 16). Cet essai est souvent appelé « essai d'éclatométrie ». Sous l'effet de la pression appliquée, la géomembrane se déforme en calotte sphérique. Il est possible en mesurant l'amplitude de cette déformation de calculer la contrainte et la déformation en tout point de la calotte sphérique pour une pression donnée. Les résultats peuvent être représentés sous forme de courbe contrainte déformation, comparable à celle de l'essai en traction simple. La pression est appliquée jusqu'à la rupture de l'échantillon. Un certain nombre de variantes de cet essai ont été élaborées puis normalisées sous la référence ASTM D5716.

Les courbes de la Fig. 17 ont été obtenues avec un récipient de diamètre 600 mm, mis sous pression hydrostatique à une vitesse de 7,0 kPa par minute. Le PEHD et les géomembranes renforcées de type CSM-R et fPP-R se rompent pour



- A. Début de mise en pression, pression = 0 kPa
- B. La géomembrane se déforme, la pression augmente
- C. La géomembrane continue de se déformer, le géotextile de renfort se rompt, la pression augmente
- D. Élongation maximale de la géomembrane avant rupture. Pour une géomembrane en PVC d'épaisseur 3 mm, la pression à la rupture était de 160 kPa, l'élongation à la rupture >270 %

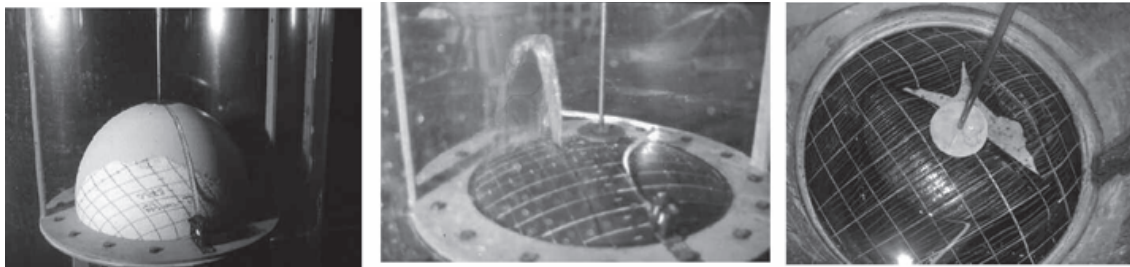


Fig. 13 à 16

Dispositif permettant de tester le comportement en tension axisymétrique et géomembranes PVC (à gauche), PEHD (au milieu) et bitumineuse (à droite) en cours d'essai

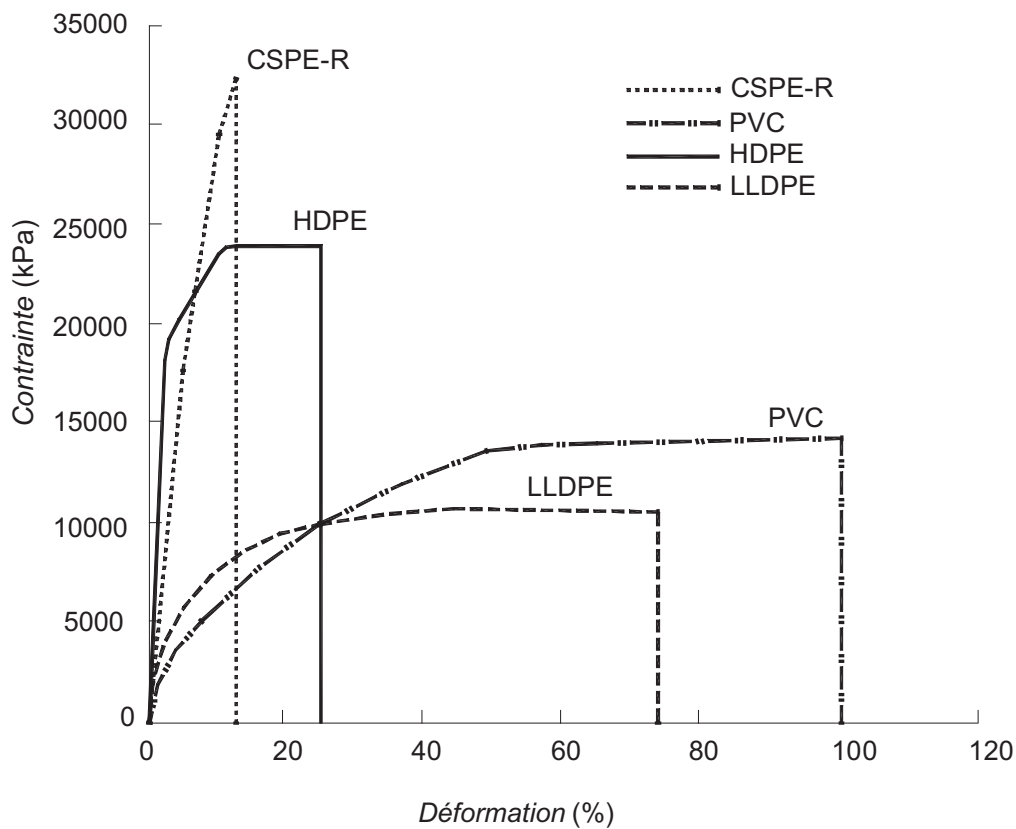


Fig. 17

Comportement effort déformation axisymétrique
(avec l'aimable autorisation de R. M. Kærner)

des déflexions et déformations relativement basses (mais pour des contraintes élevées), alors que les géomembranes extensibles de type PVC, PELBD et fPP subissent une rupture à des déflexions et contraintes notablement plus élevées. Les résultats sont assez différents de ceux obtenus lors de l'essai de caractérisation de la Fig. 12. Ceci montre qu'une modélisation appropriée de la situation sur le terrain est absolument nécessaire pour une approche de conception fonctionnelle.

Un essai de performance spécifique a été conçu pour l'installation d'un géocomposite PVC sur le barrage en remblai de Bovilla (91 m, Albanie, 1996). Cet essai est illustré par la Fig. 18.

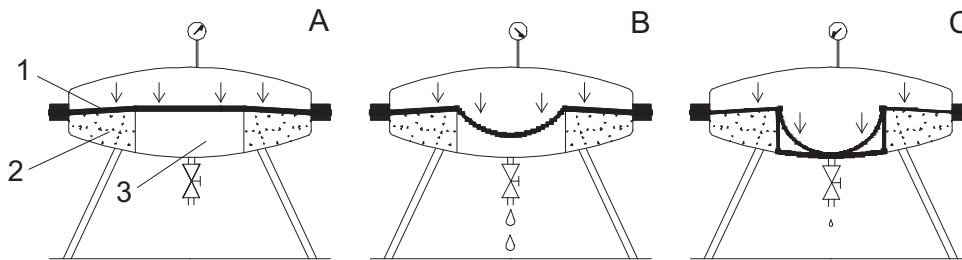


Fig. 18

Essais de performance pour la résistance à des tassements différentiels

1. Géocomposite PVC
2. Couche de support (graviers du barrage)
3. Eau

- A. Mise en charge terminée, pression constante = 100 m
- B. La subsidence commence, le géocomposite se distend
- C. Subsidence terminée. Le géocomposite PVC d'une épaisseur de 3 mm se distend de 213 % sans rupture et sans atteindre sa capacité de déformation totale.

L'essai est effectué dans un récipient pressurisé. Le géocomposite est disposé sur un matériau imitant la couche de support de graviers du barrage. Au milieu du support, une dépression circulaire est créée sur toute la hauteur du récipient. La dépression est remplie d'eau, pour former un support continu gravier/eau sur lequel le géocomposite est disposé. Le récipient est fermé, et une pression d'eau donnée est appliquée. Par l'intermédiaire d'une valve située au fond du récipient, l'eau se trouvant dans la dépression est instantanément vidée, créant ainsi une cavité importante sous le géocomposite. Sous la pression de l'eau, le géocomposite se déforme dans la cavité. Cet essai évalue la capacité de la géomembrane étudiée à résister à des tassements différentiels soudains provoquant des déformations > 200 %. Les géocomposites flexibles de type PVC renforcés par un géotextile se comportent de manière très satisfaisante.

2.2.4.4. Résistance au poinçonnement (essai d'identification/performance)

Les géomembranes placées sur tout type de support rugueux agressif, ou de sol contenant des pierres, des morceaux de bois ou autres débris, ou remblayées, sont vulnérables au poinçonnement. Les contraintes en poinçonnement peuvent provoquer des fuites, qui dans le cas d'une géomembrane recouverte sont difficiles à localiser, et dont la réparation revient très chère.

Les essais d'identification utilisés par les fabricants dans le cadre du contrôle qualité montrent, comme on peut s'y attendre, qu'une plus grande épaisseur et un renforcement améliorent la résistance au poinçonnement de la géomembrane.

Un essai d'identification qui peut permettre de comparer le comportement au poinçonnement de tous les types de géomembranes est l'essai de poinçonnement CBR, conformément à la norme EN ISO 12236.

Le doublage par un géotextile non-tissé aiguilleté, qu'il se trouve au dessus ou en dessous, améliore la résistance au poinçonnement de manière assez impressionnante.

L'importance de la résistance au poinçonnement, lorsque des granulats de granulométrie élevée sont utilisés pour le drainage, comme couche de support ou de couverture dans les nouveaux barrages, ou comme couche de support lors de la réparation de barrages existants, montre la nécessité d'un essai de performance simulant les conditions sur site. La plupart des essais mettent en œuvre un récipient pressurisé de grand diamètre (une taille de 500 mm est suffisante pour éliminer la plupart des effets de bord) avec un granulat-support similaire, voire identique sous l'échantillon de géomembrane. Plusieurs variantes sont en cours d'évaluation :

- Le support réel (sable, gravier, pierres, etc.) à la densité prévue,
- Le support réel disposé dans un moule époxy (appelé « rock pizza »), de manière à avoir les échantillons dans la même configuration pour chaque essai,
- Des cônes tronqués disposés en triangle pour simuler un cas particulièrement défavorable de support.

Les Fig. 19 à 22 présentent un essai de cas très défavorable dans un dispositif d'essai à haute pression de 600 mm de diamètre effectif, capable d'appliquer des pressions d'eau correspondant à 250 m de charge.

Les matériaux présentant le meilleur comportement sont en général ceux de type thermodurcissable et PVC; le comportement le moins bon est celui du PEHD. Le PVC présente des valeurs assez élevées, en général dans des géomembranes homogènes. Lorsque le matériau vieillit, la charge de poinçonnement augmente et les valeurs de distance de la déformation diminuent notablement.

Les recherches effectuées en 1995 par *l'US Army Corps of Engineers* pour la mise en place de géomembranes sous l'eau ont permis d'évaluer un certain nombre

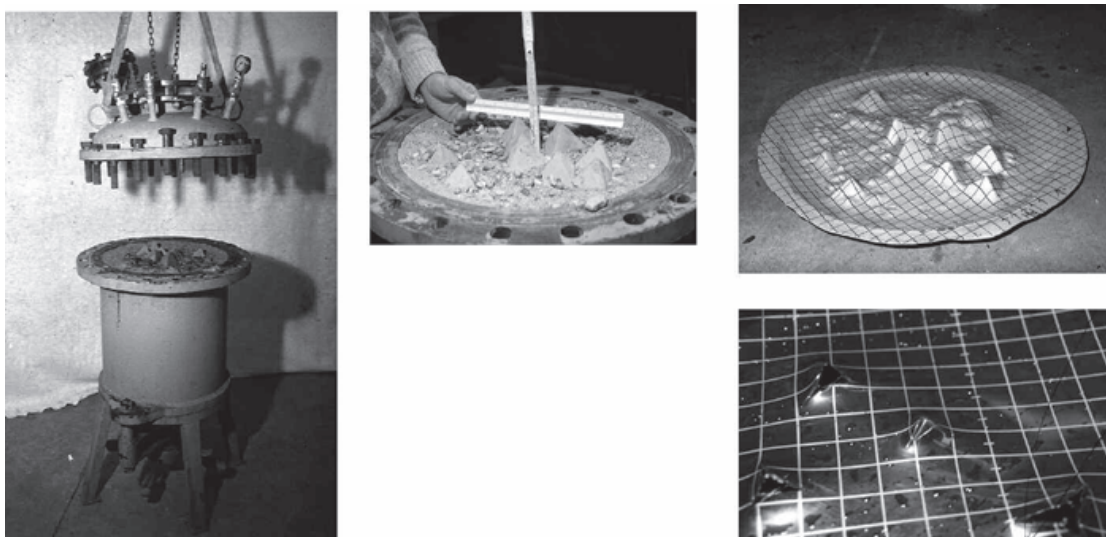


Fig. 19 à 22

Récipient pressurisé, support pyramidal, PVC intact à 1 MPa et PEHD se rompant à 0,15 MPa
(avec l'aimable autorisation de l'US Army Corps of Engineers)

de géomembranes courantes (PVC, PEHD, CSM-R et PELBD), avec ou sans protection géotextile sur un support agressif de référence. Leur comportement a été également examiné lors d'un essai sur cônes tronqués, et en essai de fluage pour évaluer les propriétés viscoélastiques des géomembranes et des couches de protection. Les résultats sont présentés dans le Rapport technique REMR-CS-50 de l'*US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station*, dont les Fig. 23 à 25 ont été tirées.

2.2.4.5. Résistance à l'impact (essai d'identification/de performance)

La chute d'objet, ou les chocs, y compris ceux causés par les couches de protection, peuvent affecter les géomembranes, provoquant des fuites ou créant des points de faiblesse à partir desquels des déchirures sont susceptibles de se propager. C'est pourquoi l'évaluation de la résistance à l'impact de la géomembrane est importante. Le test statique consiste à enfoncer une barre à vitesse constante dans un échantillon de géomembrane maintenu par deux colliers au dessus d'un trou. Le test dynamique consiste à projeter un objet sur l'échantillon.

Ces essais d'identification ont été récemment intégrés à des essais de performance en grandeur réelle, en faisant tomber des rochers sur les géomembranes concernées.

Les géomembranes les plus épaisses ont en général une résistance à l'impact supérieure. Le renforcement par grille n'améliore pas significativement la résistance à l'impact, contrairement à une couche géotextile placée sous ou sur la géomembrane.

2.2.4.6. Résistance à la déchirure (essai d'identification/de performance)

Les données concernant la résistance à la déchirure sont nécessaires lorsque les géomembranes sont posées sur des surfaces inclinées. La résistance à la déchirure de nombreuses géomembranes fines et non renforcées est assez faible, ce qui a des conséquences importantes pour le maniement et l'installation de la géomembrane.

La mesure de la résistance à la déchirure de la géomembrane peut être effectuée de nombreuses manières. Le renforcement est une solution avantageuse. Le risque de déchirure à la pose décroît lorsque l'épaisseur de la géomembrane augmente, et les contraintes de déchirure en exploitation courante, calculées à la conception, deviennent fondamentales.

2.2.4.7. Résistance en cisaillement à l'interface (essai d'identification/de performance)

La détermination de la plus petite résistance en cisaillement aux interfaces de l'ensemble du DEG est essentielle pour les études préliminaires du système sur les pentes d'un barrage en remblai; cet aspect est présenté au Paragraphe 4.2. Si le frottement n'est pas suffisant, la couche glissante doit être ancrée ou supportée. Deux méthodes de test sont utilisées pour évaluer la situation : une version adaptée du test en cisaillement direct géotechnique, et le test spécifique du plan incliné (norme EN ISO 12957/2).

RESUME DES RESULTATS DE L'ESSAI DE POINÇONNEMENT MULTIAXIAL	
PVC 1 mm	Rupture à 0,6 MPa (entre les pyramides dans la cavité). S'adapte au support, bonne récupération élastique.
PVC 1,5 mm	Rupture à 1 MPa après 6 heures (sur une pierre aigüe). S'adapte au support, bonne récupération élastique.
PVC 2 mm	Pas de rupture, s'adapte au support, très bonne récupération élastique.
PVC 2,5 mm	Pas de rupture, ne s'adapte pas parfaitement au support, très bonne récupération élastique.
PVC-R PVC 1 mm + 200 g/m ² NT	Rupture à 1 MPa après 10 heures (entre les pyramides dans la cavité). S'adapte au support, récupération élastique supérieure à un PVC correspondant non renforcé.
PVC-R PVC 1,5 mm + 200 g/m ² NT	Rupture à 1 MPa après 10 heures (sur une pierre aigüe). S'adapte au support, récupération élastique supérieure à un PVC correspondant non renforcé.
PVC-R PVC 2 mm + 200 g/m ² NT	Pas de rupture. S'adapte au support, récupération élastique supérieure à un PVC correspondant non renforcé
PVC-R PVC 2,5 mm + 500 g/m ² NT	Pas de rupture. S'adapte au support, récupération élastique supérieure à un PVC correspondant non renforcé
CSPE-S 1 mm	Rupture à 1 MPa (sur les pyramides et dans les cavités). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
CSPE-S 1,2 mm	Rupture à 1 MPa (sur les pyramides et dans les cavités). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
CSPE-S 1,4 mm	Rupture à 1 MPa (sur les pyramides et dans les cavités). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
CSPE-R CSPE 0,8 + 0,4 mm	Rupture à 0,8 MPa (sur pierre aigüe et dans les cavités). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
CSPE-R CSPE 1mm + 0,4 mm	Rupture à 0,8 MPa (sur pierre aigüe et dans les cavités). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
CSPE-R CSPE 2 mm + 0,4 mm	Rupture à 0,8 MPa (sur pierre aigüe et dans les cavités). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
PP 1,5 mm	Rupture à 1 MPa (sur les pyramides et dans les cavités). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
PP-R PP 1,5 mm + 300 g/m ² NT	Rupture à 1 MPa (sur les pyramides). S'adapte au support, mauvaise récupération élastique.
EPDM 2 mm	Pas de rupture. S'adapte assez bien au support. Récupération élastique totale.
EPDM 3 mm	Pas de rupture. S'adapte assez bien au support. Récupération élastique totale.
HDPE 1,5 mm	Rupture sur les pyramides à 0,15 MPa. Ne s'adapte pas au support. Pas de récupération élastique.
HDPE 2 mm	Rupture sur les pyramides à 0,3 MPa. Ne s'adapte pas au support. Pas de récupération élastique.
HDPE 2,5 mm	Rupture sur les pyramides à 0,35 MPa. Ne s'adapte pas au support. Pas de récupération élastique.
Note : NT = non tissé	

Fig. 23
 Résultats d'essais multiaxiaux
 (avec l'aimable autorisation de l'US Army Corps of Engineers)

Tableau 4 - Évaluation des géomembranes pour installation sous l'eau

Propriétés	Pondé- ration	PVC		PVC-R		CSPE-S		CSPE-R		PP		PP-R		EPDM		HDPE	
		Note	Points	Note	Points	Note	Points	Note	Points	Note	Points	Note	Points	Note	Points	Note	Points
Partie A																	
Imperméabilité	5	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25
Comportement en traction	5	4	20	5	25	5	25	5	25	3	15	5	25	4	20	2	10
Résistance à la déchirure	5	3	15	5	25	5	25	5	25	3	15	4	20	5	25	4	20
Résistance au poinçonnement	5	4	20	5	25	3	15	3	15	3	15	4	20	4	20	2	10
Flexibilité	5	5	25	5	25	5	25	3	15	5	25	4	20	5	25	2	10
Poids spécifique	5	5	25	5	25	5	25	5	25	1	5	1	5	5	25	1	5
Facilité de soudage	4	5	20	5	20	3	12	3	12	4	16	4	16	3	12	2	8
Stabilité dimensionnelle	1	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4	5	5	4	4	3	3
Points totaux A			154		175		157		146		120		136		158		91
Partie B																	
Constructibilité d'ensemble	4	5	20	5	20	4	16	4	16	3	12	3	12	4	16	1	4
Applications intérieures	4	5	20	5	20	4	16	1	4	2	8	2	8	2	8	2	8
Durée de vie	3	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15
Disponibilité	2	4	8	4	8	2	4	1	2	3	6	3	6	3	6	5	10
Réparabilité	2	5	10	5	10	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	1	2
Coût	2	4	8	4	8	2	4	2	4	3	6	3	6	1	2	5	10
Points totaux B			81		81		63		49		53		53		53		89
Points totaux A & B			235		256		220		195		173		189		209		140
Classement			2		1		3		5		7		6		4		8

Fig. 25 - Classement final des géomembranes (avec l'aimable autorisation de l'US Army Corps of Engineers)

2.2.4.8. *Test de l'ancrage par insertion (essai d'identification/de performance)*

L'extrémité supérieure d'une géomembrane ancrée dans une tranchée d'ancrage en crête, ou ancrée dans une rainure en pied du barrage, ou encore fixée contre le mur en béton d'une vidange de fond, subissent à la fois à des forces de traction et de compression. Les études doivent se pencher sur la profondeur d'ancrage et sur les contraintes normales qui vont éprouver la résistance de la géomembrane. La valeur limite pourrait être la résistance en traction en limite d'élasticité, à la rupture de la grille, ou pour une déformation prédéfinie.

2.2.4.9. *Comportement à la traction des soudures (essai d'identification/de performance)*

Pour déterminer la résistance d'une soudure de géomembrane, un certain nombre d'essais sont disponibles. Pour l'essai de résistance à la traction sur un joint, comme pour l'essai de pelage, un échantillon représentatif (en général d'une largeur de 25 mm) est prélevé à travers la soudure, et les extrémités non soudées sont placées dans les mâchoires d'une machine d'essai en traction. On considère parfois que l'essai en traction simule un des aspects de la performance, tandis que l'essai en pelage est plutôt un essai de caractérisation. Il est important de les effectuer tous les deux pour une évaluation complète de la qualité du joint.

2.2.4.10. *Fissuration sous contrainte (essai d'identification/de performance)*

La fissuration sous contrainte ne concerne que les géomembranes PEHD, et consiste en l'apparition de fissures à un moment difficile à prévoir de la vie du matériau, causées par des contraintes en traction ou compression à long terme. La fissuration sous contrainte est accélérée par les températures élevées. Les fissures de contrainte apparaissent aux zones qui concentrent les contraintes dans la feuille (« stress risers »). Ces zones de contrainte sont en général les changements d'épaisseur du matériau (par exemple en limites de joints), toute entaille ou rayure de profondeur notable (par exemple impact, ou rayure effectuée par un granulat agressif), ou tout matériau non uniforme, etc. Les points d'initiation les plus probables sont sur les soudures, notamment les soudures par extrusion ou les soudures par fusion surchauffées.

Pour éviter la fissuration sous contrainte, une résine adaptée est nécessaire. Actuellement, il faut plus de 150 heures pour l'essai de fissuration sous contrainte à charge constante sur point unique entaillé SP-NCLT (ASTM D5397 Annexe A).

2.2.5. Durée de vie et méthodes d'essais

Le comportement d'une géomembrane doit être étudié en fonction de sa résistance au rayonnement (principalement ultraviolet), à la température, aux attaques biologiques, aux produits chimiques et à tout autre phénomène relatif à l'environnement pouvant provoquer une scission de la chaîne polymérique ou une rupture des liaisons dans la structure polymère, et pouvant nuire à la performance à long terme. Avec le temps, le polymère a tendance à devenir cassant dans son comportement effort-déformation, avec par conséquent une perte de souplesse, une diminution de l'élongation à la rupture, une augmentation du module d'élasticité et

une modification de la contrainte ultime à la rupture. La répétition à étapes régulières de la mesure des propriétés physiques et mécaniques présentées dans cette section permet le suivi du processus de vieillissement.

Les données sur l'altération météorologique (effets combinés des cycles de mouillage, des changements de température et de l'exposition aux UV) sont requises pour des applications où la barrière sera exposée aux intempéries sans couverture de protection adéquate. Il est conseillé néanmoins de les étudier également dans le cas d'une géomembrane protégée, car les recherches les plus récentes ont démontré que le processus de vieillissement apparaît également en présence d'une couche de couverture, mais de manière plus lente que pour une géomembrane exposée.

2.2.5.1. Rayonnement ultraviolet (essai d'identification/de performance)

Le rayonnement ultraviolet provoque une dégradation des géomembranes. L'énergie des courtes longueurs d'onde du rayonnement solaire peut pénétrer la structure polymère en entraînant des scissions de chaîne et des ruptures de liaisons. De nombreux essais standard d'exposition accélérée en laboratoire sont disponibles, par exemple la méthode de la lampe fluorescente UV, ou la méthode de la lampe à arc au xénon.

Comme il est pratiquement impossible de prévoir la durée de vie à partir de ces essais d'identification, des essais d'altération météorologique en plein air à long termes (plusieurs années, voire décennies) sont effectués. Des données extrêmement utiles sont tirées d'essais de performance sur des types similaires de géomembranes exposées dans des conditions semblables pendant un nombre d'années identique.

Les géomembranes utilisées dans des dispositifs d'étanchéité couverts, et qui ne sont pas conçues pour résister aux UV, doivent être protégées dans les 12 heures suivant leur déploiement.

2.2.5.2. Agression thermique

De nombreuses caractéristiques des géomembranes sont sensibles aux changements de température. Les températures élevées ou au contraire très basses ont chacune leur type d'effet.

2.2.5.2.1. Températures élevées

Les matériaux des géomembranes exposées à la chaleur sont soumis à des changements de caractéristiques physiques, mécaniques ou chimiques. L'amplitude et la durée d'exposition déterminent la portée de ces évolutions. Cet essai, de nature qualitative, peut inciter à effectuer des comparaisons entre les géomembranes candidates dans des situations critiques, ou à utiliser de nouveaux échantillons pour chaque période d'incubation avant d'effectuer des essais comparatifs en traction.

2.2.5.2.2. Températures basses

L'évaluation des effets du froid sur les géomembranes est exactement l'inverse de l'évaluation des effets de la chaleur. Les basses températures rencontrées normalement en exploitation sur un barrage ne dégradent pas généralement la géomembrane de manière sensible. Le froid diminue la flexibilité, et les joints sont plus difficiles à effectuer. La méthode de soudure prévue doit être testée aux températures du site.

2.2.5.2.3. Dilatation et contraction thermique

Les essais déterminent le coefficient de dilatation ou contraction thermique, et les évolutions dimensionnelles des géomembranes lorsqu'elles sont exposées à des variations de température. Les matériaux rigides et épais (par exemple le PEHD, Fig. 26) forment des ondulations qui peuvent entraver fortement la mise en place de la géomembrane, rendent le soudage plus difficile, réduisent le frottement entre la géomembrane et son support, provoquent des contraintes excessives sur les ancrages et créent des cheminements privilégiés pour l'infiltration d'eau. Si le poids de l'eau ou de la couverture plie la géomembrane sur une ondulation, ceci créera une zone de rupture préférentielle.



Fig. 26 et 27

Ondulations sur PEHD rigide (à gauche, barrage de Pactola, États-Unis, 1987)
Absence d'ondulations sur un PVC flexible (à droite, batardeau d'Alento, Italie, 1988)

2.2.5.3. Effets biologiques

Un nombre incroyablement élevé d'organismes vivent dans le sol et dans l'eau. Nous nous concentrons ici sur les organismes pouvant présenter un danger pour les géomembranes.

2.2.5.3.1. Animaux

Aucune procédure d'essai n'a été établie jusqu'ici, et ce n'est qu'intuitivement que l'on pourra dire que plus la géomembrane sera épaisse et dure et robuste, plus sa résistance aux attaques animales sera grande. Au niveau statistique, la base de données ne rapporte pas de dommages provoqués par les animaux.

2.2.5.3.2. Champignons

Dans cette catégorie, on inclut les moisissures, les levures et les champignons. Le plus grand souci n'est pas la dégradation polymérique, mais la possibilité que des dépôts de champignons entravent les écoulements dans le système de drainage, souvent construit conjointement avec le revêtement lui-même. Au niveau statistique, la base de données ne rapporte pas d'incidents, de dommages ou d'obstruction par les champignons.

2.2.5.3.3. Bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires, parmi les formes de vie les plus simples et les plus petites. Comme pour les champignons, la préoccupation la plus importante est l'engorgement ou l'obstruction des systèmes de drainage. Au niveau statistique, la base de données ne rapporte pas de dommages ou d'engorgement provoqués par les bactéries.

2.2.5.3.4. Micro-organismes

Il existe des essais sur site et en laboratoire pour évaluer la résistance aux micro-organismes, notamment :

- Des échantillons peuvent être enfouis dans des conditions difficiles ;
- Des échantillons peuvent être testés en laboratoire par exposition à un mélange de différents types de micro-organismes (28 jours à 28 °C et 95 % d'humidité relative).

2.2.5.3.5 Racines

Des données concernant la pénétration des racines sont nécessaires pour toutes les applications où la barrière géosynthétique est exposée à des sols sur lesquels la végétation est reconstituée. Une méthode d'essai européenne existe, fondée sur une norme suisse.

2.2.5.4. Agression chimique (*essai d'identification/de performance*)

La résistance des géomembranes aux agressions chimiques a été inventoriée, et les fabricants ont développé des tableaux présentant cette résistance pour différentes géomembranes au contact avec une grande variété de produits chimiques.

Dans certaines situations spécifiques, des tests supplémentaires peuvent être requis, par exemple :

- Sur le joint périphérique étanche, là où la géomembrane est fixée par l'intermédiaire d'un plat de fixation et de couches de répartition de compression. La compatibilité à long terme de la géomembrane avec la

Tableau 9

Indications générales de résistance chimique pour certaines géomembranes*
 Source : "Designing with geosynthetics", par Robert M. Kærner, quatrième édition

Produits chimiques	Type de Géomembrane							
	PVC		PE		CSM		EPDM	
	38 °C	70 °C	38 °C	70 °C	38 °C	70 °C	38 °C	70 °C
Substances générales								
Hydrocarbures aliphatiques			x	x				
Hydrocarbures aromatiques			x	x				
Solvants chlorés			x	x			x	
Solvants oxygénés			x	x			x	x
Solvant à base de pétrole brut			x	x				
Alcools	x	x	x	x			x	x
Acides								
Organiques	x	x	x	x	x		x	x
Inorganiques	x	x	x	x	x		x	x
Métaux lourds	x	x	x	x	x		x	x
Sels	x	x	x	x	x		x	x

*Abréviation : x = en général bonne résistance.

couche de support en résine ou avec le joint caoutchouc est extrêmement importante.

- Lorsque la géomembrane est soudée à un joint synthétique de matériau différent.
- Lorsque les tableaux existants ne mentionnent pas de nouveaux types ou de nouvelles formulations de géomembranes.

2.2.5.4.1. Résistance à l'ozone

Les matériaux de type thermodurcissable (excepté l'EPDM qui est résistant à ce gaz, de par sa propre formulation) doivent passer avec succès l'essai de comportement à l'ozone.

2.2.5.4.2. Contact avec l'eau (essai d'identification)

Le lessivage éventuel par l'eau des substances contenues dans les matériaux composant la géomembrane peut être évalué rapidement par un essai accéléré de résistance à la migration effectué par exemple par immersion de la géomembrane dans l'eau à 60 °C sur une période de 14 jours.

2.2.5.5. *Oxydation*

La création de radicaux libres peut provoquer la scission de la chaîne, et donc le vieillissement. La réaction s'accélère en général une fois qu'elle a été déclenchée. Des antioxydants sont ajoutés au composé pour désactiver ces radicaux libres de manière à stopper, ou au moins ralentir le processus. Ces additifs, ou stabilisateurs, sont spécifiques à chaque type de résine. En général, une fois que la géomembrane a été couverte par du remblai, ou un liquide, la dégradation par oxydation est fortement ralentie.

2.2.5.6. *Effets de synergie*

Chacun des phénomènes de dégradation a été décrit séparément et individuellement. Toutefois, dans la pratique, il est fort probable que deux ou plusieurs mécanismes agissent simultanément. L'évaluation de l'effet combiné de ces phénomènes est le fondement de la prévision de durée de vie des géomembranes.

2.2.6. Essais spécifiques pour les géomembranes bitumineuses

Parallèlement aux essais pouvant être effectués sur toutes les géomembranes, il existe des essais spécifiques qui doivent être exécutés sur les géomembranes bitumineuses.

Les caractéristiques listées ci-dessous doivent être prises en compte par le chef de projet pour déterminer si la géomembrane proposée est adaptée aux contraintes qu'elle va subir sur l'ouvrage, et conforme aux normes requises. La valeur de ces caractéristiques dépendra de l'épaisseur de la géomembrane, et du type de bitume (oxydé ou polymérisé). On étudiera donc spécifiquement les caractéristiques suivantes :

- Planéité des lés (ondulations maximales),
- Durée de vie des joints (effets de l'eau et de la température),
- Composition (pourcentage de bitume, fines et renforcement),
- Spectre infrarouge,
- Caractéristiques du bitume (température, test bille et anneau, pénétrabilité à une température donnée).

2.2.7. La norme CEN EN 13361 « Barrières géosynthétiques - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des réservoirs et des barrages recourant à ces techniques »

Des études importantes ont été effectuées en Europe pour déterminer et tester les caractéristiques essentielles des géomembranes pour les barrages. Depuis 2001, le CEN, Comité Européen de Normalisation, avec la contribution d'experts de tous les pays membres de l'Union Européenne, a préparé un projet de norme prEN 13361 intitulée « Barrières géosynthétiques - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des réservoirs et des barrages recourant à ces techniques ». La norme proposée a été approuvée par les pays membres de la CE et publiée en août 2004 sous

le nom EN 13361. Cette norme permet aux fabricants de décrire les barrières géosynthétiques sur la base de valeurs déclarées des caractéristiques pertinentes pour l'utilisation prévue, et si testées avec telle ou telle méthode donnée. Elle inclut également des procédures pour l'évaluation de la conformité et pour les contrôles de production en usine.

Cette norme prend en compte les géomembranes protégées et exposées. Une fois en vigueur, cette norme sera d'une très grande utilité, car aucune géomembrane ne pourra être mise sur le marché si elle n'est pas étiquetée en conséquence. L'étiquette indiquera les valeurs sous responsabilité du fournisseur, correspondant à une liste de propriétés fondamentales. Ces valeurs, calculées selon des procédures d'essai identiques, sont homogènes pour un type donné de géomembranes, et donc comparables.

Cette norme sera également très utile pour les concepteurs, les utilisateurs finaux et autres parties intéressées, car c'est un outil permettant de définir les caractéristiques pertinentes pour les spécifications et pour les contrôles de qualité sur site.

Les caractéristiques et méthodes d'essai à utiliser sont données dans le Tableau 10. La lettre H désigne un essai harmonisé, c'est-à-dire valide pour l'obtention du label CE pour une mise sur le marché autorisée en Europe. Le label CE n'est pas un label de qualité.

Les spécifications définiront les fonctions et conditions d'utilisation qui sont envisageables. Le producteur doit fournir les données nécessaires, sur la base des exigences et méthodes d'essai décrites dans cette norme.

Le Tableau 11 complète les normes d'essai applicables en Europe avec les normes équivalentes en vigueur en Amérique du nord (normes ASTM).

Un autre aspect à prendre en compte est le recyclage du matériau, conformément à une technologie homologuée. Toutefois, en considération de la longue durée de vie que l'on peut attendre d'une géomembrane dans un barrage, le recyclage en fin de vie ne devrait pas être l'un des paramètres de classement les plus importants.

Le fabricant doit indiquer les caractéristiques sous la forme d'une valeur moyenne, accompagnées d'une plage de tolérance correspondant à un niveau de confiance de 95 %, fondée sur l'interprétation statistique de ses mesures internes pour le contrôle qualité.

L'information concernant la durée de vie doit être exprimée conformément aux directives appropriées.

L'étiquetage des produits s'effectuera conformément à EN ISO 10320. Des essais initiaux d'identification seront effectués par le fabricant pour définir les valeurs des caractéristiques, et doivent l'être également pour les produits existants lorsqu'une modification des matériaux de base ou des procédures de fabrication ont un impact sur les caractéristiques déclarées.

Tableau 10
Propriétés et méthodes d'essai exigées par la norme européenne EN 13361
pour l'utilisation de géomembranes sur les barrages

		Géomembrane couverte en exploitation		Géomembrane non couverte en exploitation		Méthodes d'essai		Remarques
		Polymère	Bitumineux	Polymère	Bitumineux	Polymère	Bitumineux	
Caractéristiques physiques	Épaisseur	A	A	A	A	EN 1849-2	EN 1849-1	
	Masse par unité de surface	A	A	A	A	EN 1849-2	EN 1849-1	
Propriétés hydrauliques	Perméabilité à l'eau (étanchéité aux liquides)	H	H	H	H	prEN 14150	prEN 14150	
Propriétés mécaniques	Résistance à la traction	H	H	H	H	ISO 527	EN 12311-1	Pour les géomembranes polymères, utiliser ISO 527, parties 1 et 3, échantillon d'essais type 5 à une vitesse de 100 mm/min, et indiquer la résistance maximale conformément à la méthode d'essai.
	Allongement	A	A	A	A	ISO 527	EN 12311-1	Pour les géomembranes polymères, utiliser ISO 527, parties 1 et 3, échantillon d'essais type 5 à une vitesse de 100 mm/min, calcul de l'allongement conformément à ISO 527-1, 10.2, en mesurant la distance entre les pinces.
	Poinçonnement statique	H	H	H	H	EN ISO 12236	EN ISO 12236	
	Résistance à l'éclatement	S	S	S	S	prEN 14151	prEN 14151	

Tableau 10 (suite)

		Géomembrane couverte en exploitation		Géomembrane non couverte en exploitation		Méthodes d'essai		Remarques
		Polymère	Bitumineux	Polymère	Bitumineux	Polymère	Bitumineux	
	Résistance à la déchirure	S	S	S	S	ISO 34	EN 12310-1	Pour les géomembranes polymères, utiliser ISO 34 méthode B, éprouvette normalisée (Fig. 2) sans encoche à une vitesse de 50 mm/min.
	Cisaillement direct de frottement	S	S	-	-	EN ISO 12957-1	EN ISO 12957-1	
	Frottement sur plan incliné	S	S	-	-	EN ISO 12957-2	EN ISO 12957-2	
Propriétés thermiques	Comportement à basse température (flexion)	S	S	S	S	EN 495-5	EN 1109	
	Dilatation thermique	A	-	A	-	ASTM D 696-91	-	
Durée de vie et résistance chimique	Altération météorologique	H	H	H	H	EN 12224	EN 12224	
	Micro organismes	A	A	A	A	EN 12225	EN 12225	
	Oxydation	H	H	H	H	prEN 14575	prEN 14575	
	Fissuration sous contrainte environnementale	H	-	H	-	ASTM D 5397-99 (annexe)	-	Uniquement applicable aux géomembranes polymères PE
	Lessivage (solubilité dans l'eau)	A	A	A	A	EN 14415	EN 14415	
	Pénétration des racines	S	S	S	S	prCEN/TS 14416	prCEN/TS 14416	

Légende :

H : propriétés concernant toutes les conditions d'utilisation, et soumises à harmonisation

A : propriétés concernant toutes les conditions d'utilisation, et non soumises à harmonisation

S : propriétés concernant des conditions spécifiques d'utilisation, et non soumises à harmonisation.

Tableau 11
 Comparaison des méthodes d'essai entre les normes EN ISO et ASTM
 pour la mise en œuvre de géomembranes polymères sur les barrages

		Méthodes d'essai pour les géomembranes polymères	
		EN ISO	ASTM
Caractéristiques physiques	Épaisseur	EN 1849-22	ASTM D5199 & D5994, dépendant de l'état de surface, lisse ou texturé
	Masse par unité de surface	EN 1849-2	ASTM D792 & D1505 pour l'évaluation de la densité
Propriétés hydrauliques	Perméabilité à l'eau (étanchéité aux liquides)	PrEN 14150	ASTM E 96
Propriétés mécaniques	Résistance en traction	ISO 527	Essais d'identification : ASTM D6693, D882, & D751, dépendant du type de polymère Essai de performance : ASTM D 5716
	Allongement	ISO 527	Essais d'identification : ASTM D6693, D882, & D751, dépendant du type de polymère Essai de performance ASTM D 5716
	Poinçonnement statique	EN ISO 12236	Essais d'identification : ASTM D4833 Essai de performance ASTM D 5514
	Résistance à l'éclatement	PrEN 14151	ASTM D 5617
	Résistance à la déchirure	ISO 34	ASTM D1004, D751, D1424, D2263, D1938 & D5884
	Cisaillement direct de frottement	EN ISO 12957-1	ASTM D5321
	Frottement sur plan incliné	EN ISO 12957-2	Pas de norme
Propriétés thermiques	Comportement à basse température (flexion)	EN 495-5	Pas de norme
	Dilatation thermique	ASTM D 696	ASTM D 696
Durée de vie et résistance chimique	Micro-organismes	EN 12225	ASTM G21 pour les champignons ASTM g22 pour les bactéries
	Oxydation	prEN 14575	ASTM D3895 & D5885
	Fissuration sous contrainte environnementale	ASTM D 5397	ASTM D 5397
	Lessivage (solubilité dans l'eau)	EN 14415	Pas de norme
	Pénétration des racines	prCEN/TS 14416	Pas de norme

2.3. VIEILLISSEMENT DES GÉOMEMBRANES. EXPÉRIENCE DE TERRAIN

En 2009, 50 ans se sont écoulés depuis la première mise en œuvre d'une géomembrane sur un barrage (Contrada Sabetta, Italie, 1959, couverte). Certaines géomembranes ont été prévues dès la phase d'études pour assurer l'étanchéité lors de la construction du barrage, d'autres ont permis de rétablir l'étanchéité de barrages existants, il y a environ 30 ans. Dans de nombreux barrages, les géomembranes ont été mises en place en position exposée, et leurs performances satisfaisantes jusqu'ici, ainsi que leur caractéristiques à l'heure actuelle, nous assurent que des matériaux similaires devraient donner satisfaction sur des périodes équivalentes, voire plus longues.

Le comportement au cours du temps dépend de la composition et de la qualité des géomembranes. En général, toutes les géomembranes se comportent de manière satisfaisante. Les cas – très rares – d'échecs concernent des types anciens de géomembranes qui ne sont plus fabriquées, ou qui ont été mal conçues. Les géomembranes conçues et fabriquées à l'heure actuelle tirent profit d'une conception, d'une fabrication, d'un contrôle et de techniques d'installation plus sophistiquées, donc on estime une majeure durée de vie.

Tableau 12
Les plus anciennes mises en place de géomembranes, par type

Type	Matériau de base	Abréviation	Total exposées	Total couvertes	Total	Les plus anciennes exposées	Les plus anciennes couvertes
Polymère	Polychlorure de vinyle - Plastifié	PVC-P	80	73	153	1974	1960
Polymère	Polyoléfine	PELBD	0	29	29	-	1970
Polymère	Polyoléfine	PEHD	3	12	15	1994	1978
Polymère	Elastomère	Polyisobutylène IIR (Caoutchouc isobutène-isoprène), EPDM	5	4	9	1982	1959
Polymère	Polyéthylène chlorosulfoné	CSM	3	5	8	1981	1986
Polymère	Polyolefin	PP	3	3	6	1995	2000
Polymère	Polyéthylène chloré	CM	0	3	3	-	1970
Bitumineux	Bitume oxydé	Géomembrane préfabriquée	7	10	17	1973	1978
Bitumineux	Bitume polymérique	SBS, bitumen éthylène, ECB	0	3	3	-	1996

Théoriquement, le vieillissement des géomembranes est plus prononcé dans les zones les plus exposées aux effets environnementaux, comme celles orientées au sud (dans l'hémisphère nord), au dessus du niveau maximum du réservoir et dans les zones de marnage. Ces zones sont en général les plus facilement accessibles, c'est pourquoi une maintenance de routine, voire exceptionnelle, y compris un remplacement, ne devrait pas être un problème majeur, ni entraîner de dépenses élevées.

2.3.1. Prévision de durée de vie basée sur les résultats de terrain

Il existe de nombreux essais en laboratoire pour prévoir la durée de vie des géomembranes synthétiques en utilisation pour l'étanchéité des barrages. Bien que des indications générales permettant la comparaison puissent être obtenues par les essais en laboratoire, la réalité peut être différente : les conditions atmosphériques, le support, l'eau du réservoir et les conditions dues à l'exploitation de ce dernier peuvent être telles que la conformité aux spécifications prévue en laboratoire puisse ne pas être confirmée au cours du temps. Pour fournir la meilleure appréciation de la durée de vie à long terme d'une géomembrane, le suivi des géomembranes déjà installées constitue la meilleure option.

La définition des essais qui devraient être effectués sur des matériaux déjà installés, pour vérifier leur état et leur intégrité, et pour décider d'une éventuelle suppression et réinstallation est beaucoup plus difficile que pour des matériaux qui viennent d'être fabriqués. De manière logique, ces essais impliquent d'utiliser des échantillons réduits de la géomembrane, et doivent être suffisamment poussés pour déterminer la condition de celle-ci. Les essais seront fonction de la nature du matériau ; dans une géomembrane PVC, il serait indispensable de déterminer la proportion de plastifiants, mais ce ne serait pas pertinent pour d'autres matériaux. De manière plus générale, il faut identifier les essais essentiels, comme :

- La perméabilité
- Le comportement à basse température
- La résistance à la traction et l'allongement
- Le poinçonnement dynamique
- Le poinçonnement statique
- La résistance à la traction et le pelage des joints.

Un autre problème consiste à définir les zones des essais qui doivent être effectués sur différentes parties du barrage : en crête, dans les zones de variation du niveau et au pied, et pour différentes orientations. Le nombre des échantillons testés devrait être fonction des dimensions de l'ouvrage. Toutefois, la zone la plus importante se trouve au sommet du barrage dans les régions septentrionales (dans l'hémisphère nord).

Un autre problème important est la fréquence de test des échantillons. En général, une fois l'installation terminée, les premiers essais ne sont effectués qu'après un certain laps de temps; par contre, après quelques années, l'inspection devrait être effectuée régulièrement.

Les paragraphes qui suivent donnent des informations sur les résultats sur site des géomembranes les plus utilisées, telles qu'on les trouve dans la base de données.

2.3.1.1. Polychlorure de Vinyle (PVC) plastifié

L'exposition à la chaleur et au rayonnement UV fait souvent perdre une partie de leurs plastifiants aux géomembranes PVC. Ceci provoque une perte de flexibilité pour la géomembrane à des degrés variés, suivant le type de plastifiant utilisé. Le choix du ou des plastifiants est absolument essentiel. La perte des plastifiants de faible poids moléculaire peut s'effectuer en quelques mois en conditions exposées, et rend la géomembrane très friable. Son étanchéité n'est par contre pas altérée.

Le CESI (Italie) a collecté des échantillons de géomembranes PVC originaires de 6 barrages italiens, en service pour des périodes s'étageant de 2 à 19 ans. Ces échantillons collectés ont été testés au niveau du contenu en plastifiant, de leur dureté, de leur résistance à la traction et de leur perméabilité. La diminution de la proportion de plastifiants a entraîné une résistance et un module un peu plus élevé. La fonctionnalité de la géomembranes n'a pas été affectée. Le coefficient de perméabilité est resté pratiquement « constant au cours du temps ». La collecte de géomembranes PVC exposées installées dans des canaux appartenant à ENEL a confirmé ces résultats satisfaisants.

La performance à long terme au contact avec des solutions salines ou acides et avec des hydrocarbures est satisfaisante, quoique des dégradations de certaines propriétés chimiques et mécaniques aient pu être notées. Le comportement des joints soudés est satisfaisant, et ne varie pas au cours du temps. C'est pourquoi, en cas de besoin de réparation de la géomembrane, la soudure de nouveau matériau sur l'ancien est possible et simple.

Tableau 13
Géomembranes PVC dans les barrages (au 31 décembre 2006) *

UNIQUEMENT PVC	Total (exposées + couvertes + partiellement couvertes + non déterminées)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	156, y compris 1 barrage de type inconnu	80, y compris 1 barrage de type inconnu	72
Barrages en remblai	83	23	57
Barrages poids/béton	41	40	1
Barrages BCR	31	16	15
Barrage le plus élevé [m]	198	188	198
Installation la plus ancienne en	1960 (Terzaghi, Canada)	1974	1950
Installation la plus récente en	2006	2006	2006

* L'installation de systèmes exposés et couverts se poursuit à ce jour.

2.3.1.2. Polyéthylène linéaire basse densité (PELBD) et polyéthylène haute densité (PEHD)

Ce polymère démontre une stabilité chimique remarquable lorsqu'il est exposé à la chaleur, au rayonnement ultraviolet et aux produits chimiques. Ces propriétés rendent toutefois le soudage assez difficile. Si un mauvais choix de résine est effectué, le PEHD est sujet à la fissuration sous contrainte, qui peut entraîner des coupures et des déchirures. La rigidité, fonction de la densité, crée des ondulations sur la géomembrane, ce qui réduit le frottement sur le support et crée des canaux préférentiels d'infiltration de l'eau. Le matériau a une flexibilité limitée hors du plan, ce qui demande un support solide. Il a été utilisé principalement en situations couvertes, comme dans les barrages en remblai.

Tableau 14
Géomembranes PELBD dans les barrages (au 31 décembre 2006)

PELBD UNIQUEMENT	Total (exposées + couvertes + non déterminées)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	30	0	29
Barrages en remblai	27	0	26
Barrages poids / béton	2	0	2
Barrages BCR	1	0	1
Barrage le plus élevé [m]	185	–	185
Installation la plus ancienne en	1970 (Atbashinsk, Kirghizistan)	–	1970
Installation la plus récente en	2000	–	2000

Tableau 15
Géomembranes PEHD dans les barrages (au 31 décembre 2006)

PEHD UNIQUEMENT	Total (exposées + couvertes + non déterminées)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	16	3	12
Barrages en remblai	15	3	11
Barrages poids / béton	0	0	0
Barrages BCR	1	0	1
Barrage le plus élevé [m]	45	45	42
Installation la plus ancienne en	1978 (Bitburg, Allemagne)	1994	1978
Installation la plus récente en	1994	1994	1993

2.3.1.3. Élastomères

Les géomembranes élastomères se dégradent progressivement sous l'influence de l'ozone, et le processus est plus rapide sous contrainte.

Le caoutchouc isobutène-isoprène est très sensible aux hydrocarbures, même à des quantités réduites flottant sous forme de film à la surface de l'eau. Des échantillons de géomembranes en caoutchouc isobutène-isoprène prélevées sur des barrages en exploitation après une dizaine d'années ont présenté des signes de rigidité accrue, notamment sur les parties exposées aux intempéries.

Tableau 16
Géomembranes élastomères dans les barrages (au 31 décembre 2006)

UNIQUEMENT ÉLASTOMÈRES	Total (exposées + couvertes + non déterminées)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	11	5	4
Barrages en remblai	11	5	4
Barrages poids / béton	0	0	0
Barrages BCR	0	0	0
Barrage le plus élevé [m]	66,6	66,6	32,5
Installation la plus ancienne en	1959 (Contrada Sabetta, Italie)	1982	1959
Installation la plus récente en	1994	1994	1988

2.3.1.4. Polyéthylène chlorosulfoné (CSM)

Le CSM, sous la marque Hypalon, réticule lors du vieillissement. Les réparations deviennent de plus en plus difficiles avec le temps, car le produit vulcanise. Il est en général renforcé par une grille polyester.

Table 17
Géomembranes CSM dans les barrages (au 31 décembre 2006)

UNIQUEMENT CSM	Total (exposées + couvertes + partiellement couvertes + non déterminées)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	9	3	5
Barrages en remblai	7	2	4
Barrages poids / béton	2	1	1
Barrages BCR	0	0	0
Barrage le plus élevé [m]	200*	200*	186*
Installation la plus ancienne en	1981 (Kölnbrein, Autriche)	1981	1986
Installation la plus récente en	1988	1981	1988

* Application partielle en pied.

2.3.1.5. Polypropylène (fPP)

Le polypropylène n'est utilisé dans les barrages que depuis peu et il n'existe pas beaucoup d'informations disponibles. Les résultats médiocres notés sur d'autres types d'applications peuvent laisser planer le doute sur la durée de vie attendue.

Tableau 18
Géomembranes PP dans les barrages (au 31 décembre 2006)

UNIQUEMENT PP	Total (exposées + couvertes + non déterminées)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	6	3	3
Barrages en remblai	6	3	3
Barrages poids / béton	0	0	0
Barrages BCR	0	0	0
Barrage le plus élevé [m]	46	16,5	46
Installation la plus ancienne en	1995 (La Contraviesa, Espagne)	1995	2000
Installation la plus récente en	2004	2004	2000

2.3.1.6. Polyéthylène chloré (CM)

Le CM a une bonne stabilité chimique à la chaleur, au rayonnement ultraviolet et à certains produits chimiques. Il tendrait à absorber l'eau à des températures élevées. Il peut être renforcé par grille ou non, suivant la flexibilité nécessaire.

Tableau 19
Géomembranes CM dans les barrages (au 31 décembre 2006)

UNIQUEMENT CM	Total (exposées + couvertes)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	3	0	3
Barrages en remblai	3	0	2
Barrages poids / béton	1	0	1
Barrages BCR	0	0	0
Barrage le plus élevé [m]	70	–	70
Installation la plus ancienne en	1970 (Odiel-Perejil, Espagne)	–	1970
Installation la plus récente en	1980	–	1980

2.3.1.7. Géomembranes bitumineuses

Très résistantes au rayonnement ultraviolet, résistantes à la contamination chimique accidentelle de l'eau du réservoir, sauf pour les hydrocarbures et les solvants organiques.

Les géomembranes bitumineuses ont été utilisées dans les barrages en remblai, surtout en France. En l'absence de couche protectrice, elles peuvent être sensible à un phénomène de « mud curling », microfissures superficielles apparaissant en présence d'un dépôt de fines d'argile ; mais cette dégradation n'affecte que l'apparence et se limite à la surface, sans altérer l'étanchéité de la géomembrane.

Tableau 20
Géomembranes bitumineuses dans les barrages (au 31 décembre 2006)

UNIQUEMENT BITUMINEUSES	Total (exposées + couvertes + non déterminées)	Exposées	Couvertes
Nombre total de barrages	20	7	13
Barrages en remblai	20	7	13
Barrages poids / béton	0	0	0
Barrages BCR	0	0	0
Barrage le plus élevé [m]	55	55	43
Installation la plus ancienne en	1973 (Banegon, France)	1973	1978
Installation la plus récente en	2000	1990	2000

2.3.2. L'expérience espagnole

L'Espagne a installé de nombreuses géomembranes sur tous types de grands réservoirs, et sous différents climats. La grande majorité de celles-ci sont exposées. Depuis de nombreuses années, un programme de recherche complet évalue les performances et la durée de vie des géomembranes dans différentes situations. Leur comportement peut être considéré comme similaire à celui qu'elles auraient eu, installées sur un barrage. Ces données importantes ont donc été incluses dans la base de données.

Les contrôles sur site sont effectués au cours du temps sur de nombreux réservoirs, présentant de nombreuses géomembranes de type variés et fabrications différentes. Une berge artificielle a été construite dans le réservoir de El Saltadero, au sud de Tenerife, et une série de matériaux, dont certains d'installation récente, y sont en cours de test.

2.3.3. L'expérience de l'utilisation sur les toits

C'est lorsque l'on utilise une géomembrane sur le toit plat de certains bâtiments industriels que l'on peut recueillir des informations précieuses sur la durée de vie.

Ces géomembranes sont en général exposées aux intempéries. Les principaux matériaux utilisés sont le PVC-P, PVC-P-R, CSM-R, EPDM-R, et depuis peu le fPP-R. Certains ont fourni un service acceptable depuis une trentaine d'année.

2.4. GÉOTEXTILES ET PRODUITS CONNEXES : CARACTÉRISTIQUES ET MÉTHODES D'ESSAI

Les géomembranes sont en général couplées à des géosynthétiques. Le concepteur doit toujours prendre en compte le DEG dans son ensemble, et les essais de performance doivent être effectués sur le(s) géosynthétique(s) couplé(s) avec la géomembrane.

Le concepteur peut se reporter aux normes CEN 13252 et 13254, dédiées à la séparation, à la filtration et au drainage dans les barrages ; un tableau des essais est présenté pour les géotextiles dans les barrages.

2.5. QUELQUES REMARQUES POUR FINIR

Dans les applications concernant les barrages, l'expérience montre que toute géomembrane n'est pas forcément utilisable en pratique, même si théoriquement, la plupart peuvent être mises en œuvre avec des études adaptées.

Dans le cas des géomembranes exposées, le choix est plus limité car les contraintes d'utilisation sont supérieures (durée de vie, ancrage et possibilités de construction). Le PVC apparaît de loin comme l'option la plus fréquemment utilisée. Toutefois, le choix du type de plastifiant est critique. Les plastifiants de poids moléculaire peu élevé sont très instables et peuvent migrer aisément. Les géomembranes PVC sont celles dont la qualité peut être la plus variable : de très bonne à extrêmement mauvaise. Il est extrêmement important de savoir si des applications antérieures ont été réussies avec la même géomembrane et le même fabricant, comme discuté au Chapitre 9.

Pour les applications couvertes, les contraintes sont moins fortes, car la durée de vie est améliorée par la présence d'une couche de couverture, qui joue également le rôle de ballast. La facilité de mise en œuvre, la résistance au poinçonnement et la résistance à la déformation (en cas de tassement du support) sont les points les plus importants à prendre en compte. Une large gamme de géomembranes peut être considérée. En général, les géomembranes flexibles sont préférées aux géomembranes trop rigides.

3. CHARGES APPLIQUÉES SUR LES DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANES (DEG)

3.1. INTRODUCTION

Les dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) sont utilisés à l'heure actuelle sur tous les types de barrages, aussi bien pour la rénovation que pour les nouvelles réalisations. Le Tableau 21 schématise les applications possibles, qui sont présentées plus en détail aux Chapitres 4 (barrages en remblai), 5 (barrages en béton) et 6 (barrages BCR).

Ce chapitre traite des charges s'appliquant au DEG sur tous les types de barrages. Les charges relatives à des applications spécifiques, et la conception des DEG pour les barrages en remblai, barrages en béton et barrages BCR sont traitées dans les chapitres correspondants.

La conception du DEG doit être effectuée conjointement aux études générales, de stabilité et de sûreté du barrage, comme pour tout autre revêtement.

3.2. CHARGES MÉCANIQUES

Les charges mécaniques s'exercent sur le DEG pendant l'installation et par la suite durant l'exploitation du réservoir. On peut faire la distinction entre les charges qui produisent des contraintes de tension dans la géomembrane, et les charges qui provoquent des dommages par poinçonnement. Les charges mécaniques peuvent être statiques : gravité, pression hydrostatique, pression atmosphérique etc. ou dynamiques : vent, action des vagues, de la glace, impact dû à la chute de particules, écoulements d'eau (à proximité des déversoirs et des exutoires) etc.

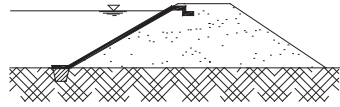
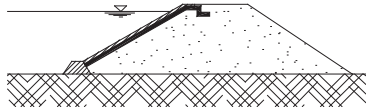
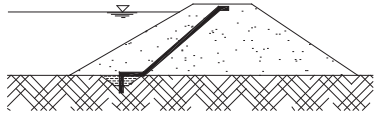
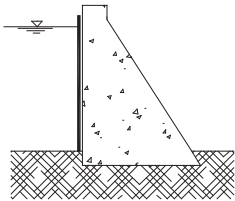
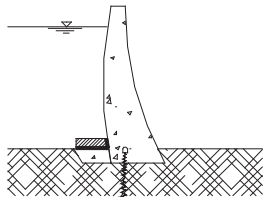
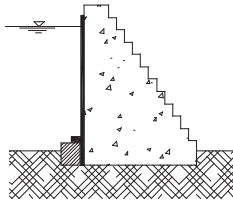
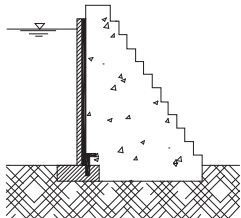
3.2.1. Charge due à la gravité

Les charges de gravité exercent des contraintes en tension sur la géomembrane. Les charges de gravité découlent :

- Du poids propre de la géomembrane ; pendant l'installation, il s'agit du poids du lé de géomembrane dans sa totalité ; après l'installation, il s'agit du poids de la partie de géomembrane située entre deux lignes ou points adjacents d'ancrage.
- Le cas échéant, le poids de la couche de couverture sur la géomembrane, augmentée par les charges de compactage pendant sa mise en place.

Le remède aux effets des charges de gravité peut être d'augmenter la résistance de la géomembrane en utilisant une meilleure géomembrane et/ou un meilleur renforcement, et de fournir un ancrage adéquat de celle-ci.

Tableau 21 - DEG sur les barrages

Figure	Total	Type d'application Certains exemples typiques
	47*	Géomembrane amont exposée sur barrages en remblai : Arcizans (France), Cracow (Australie), Midtbotnvatn (Norvège), Moravka (République tchèque), Regulating Reservoir (Etats-Unis), Sa Forada (Italie), Upper Pond Okinawa (Japon), Winscar (RU)
	106	Géomembrane amont couverte sur barrages en remblai : Bovilla (Albanie), Contrada Sabetta (Italie), Jibiya (Nigéria), Middle Creek (Etats-Unis), Rouchain (France), Symvoulos (Chypre), Wenholthausen (Allemagne)
	20	Géomembrane centrale sur les barrages en remblai : Atbashinsk (CEI), Fencheng (Chine), Hongya (Chine), Zushou (Chine). Goose Lake (Etats-Unis)
	42*	Géomembrane amont exposée sur barrages en béton ou maçonnerie : Beli Iskar (Bulgarie), Brändbach (Allemagne), Butgenbach (Belgique), Chambon (France), Illsee (Suisse), Kadamparai (Inde), Lago Nero (Italie), Lost Creek (Etats-Unis), Pracana (Portugal)
	5**	Géomembrane amont couverte sur barrages en béton : Dashicun (Chine), Katse (en pied, Lesotho), Zillergründl (en pied, Autriche)
	17	Géomembrane amont exposée sur barrages BCR : Balambano (Indonesie), Concepcion (Honduras), Miel I (Colombie), Mujib (Jordanie), Olivenhain (États-Unis), Riou (France), Wenquanbao (Chine)
	17	Géomembrane amont protégée sur barrage BCR : Buckhorn (États-Unis), Burnett River (Australie), Hunting Run (États-Unis), North Fork Hughes River (États-Unis), Penn Forest (États-Unis)

* Les données pour les géomembranes partiellement exposées et partiellement couvertes ont été incluses dans la section « exposées ».

** Tous les cas, sauf un en Chine, se rapportent à des applications en pied sur des surfaces limitées.

La charge de gravité provoque également un frottement superficiel sur la géomembrane et donc une contrainte de cisaillement sur des surfaces inclinées. Le remède aux contraintes en cisaillement est un ancrage adéquat ou une stabilisation de la couche de couverture.

3.2.2. Déformation différentielle du support

La charge mécanique appliquée par la déformation différentielle du support n'affecte en général que les barrages en remblai, et les considérations qui suivent ne peuvent concerner les barrages en béton ou BCR qu'en présence de joints actifs ou de déformations différentielles localisées, qui peuvent survenir lorsque les fondations sont médiocres ou en cas d'évènement sismique.

La déformation différentielle du support concerne principalement :

- Les fondations de barrages constituées de matériaux compressibles, et/ou de compressibilité variable,
- Les remblais de barrage compressibles, ou remblais de barrage de compressibilité variable,
- Les variations rapides de l'inclinaison des appuis, spécialement au pied des versants de la vallée,
- Les interfaces avec les ouvrages béton,
- Les zones au sommet du barrage où les nappes géosynthétiques peuvent être ancrées dans le remblai.

Les caractéristiques en traction (élongation et élasticité) de la géomembrane, et la conception de l'interface (raccordements avec les ouvrages béton, support sur les joints) sont les facteurs les plus importants à considérer pour la sélection de géomembranes afin qu'elles résistent aux contraintes en traction provoquées par les déformations différentielles.

3.2.3. Charge de poinçonnement

La charge provoquée par des arêtes aigues ou par la chute d'objets peut se concentrer et provoquer un poinçonnement de la géomembrane. Cette charge peut s'exercer à trois moments différents de la vie de l'ouvrage :

- Lors de l'installation de la géomembrane, par suite de chutes d'outils ou d'accrocs et usure provoqués par les ouvriers et les équipements de chantier, et principalement pour les barrages en remblai, par les ouvriers marchant sur la géomembrane.
- Sur les barrages en remblai ou BCR, lors de la mise en place de la couche de couverture ou la construction des ouvrages bétons; il faut souligner que la construction de la couche de couverture est l'étape la plus cruciale quel que soit le dispositif d'étanchéité, et doit donc être exécutée avec le plus grand soin.
- Après que le barrage est mis en eau, du fait de la pression hydrostatique appliquant la géomembrane contre des protubérances du support, de la chute de pierres, de débris flottants, de glace etc. ou à cause des dommages provoqués par les outils et l'équipement pendant les travaux de maintenance. Le poinçonnement peut également être dû au vandalisme.

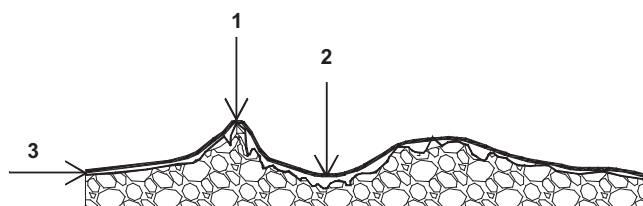


Fig. 28

Charges provoquées par une couche de support rugueuse

- 1 Perforations envisageables
- 2 Éclatement envisageable
- 3 Géomembrane

Pour éviter les dommages pendant la période de construction de barrages en remblai, il est judicieux de protéger la géomembrane contre les impacts des pierres ou blocs de protection et le trafic piéton par un géotextile.

Les véhicules et équipements ne devraient jamais circuler directement sur la géomembrane. Les véhicules devraient circuler sur une couche de protection déterminée par des essais de performance en grandeur réelle. La charge se répartit de manière acceptable avec une couche d'au moins 30 cm de terre de granulation fine, et les véhicules à chenilles sont préférables aux véhicules sur roues.

On recommande souvent la mise en place d'un géotextile sous et sur la géomembrane. Les composites de géomembrane/géotextiles fabriqués en usine sont de bonnes solutions, car ils sont efficaces pour éviter le poinçonnement et le glissement, en raison de l'angle de frottement accru. Les géocomposites réduisent le risque de soulèvement dû au vent pendant l'installation, et permettent une installation plus rapide.

Les dommages provoqués par les particules agressives du support peuvent être évités en utilisant une couche inférieure de géosynthétique, et dans les barrages en remblai en interposant une couche de sable ou de gravier stabilisé. En l'absence de sous-couche, le support doit être soigneusement examiné avant de mettre la géomembrane en place. Sur les barrages en béton ou BCR, les irrégularités excessives doivent être uniformisées, et les zones en nid d'abeille rebouchées. Dans les barrages en remblai, pour s'assurer que des particules agressives de taille plus importante n'arrivent pas au contact de la géomembrane en cas de percolation dans le support, un dispositif de drainage efficace est installé en général derrière celle-ci, et un suivi est mis en place.

En exploitation, les dommages provoqués par les impacts de débris flottants, la faune etc. peuvent être évités par l'utilisation d'une géomembrane robuste. Une autre solution consiste à mettre en place une couche de couverture.

Une attention particulière doit être donnée à la mise en place de géomembranes de type thermodurcissable. en raison de leur résistance inférieure aux impacts dynamiques. Ces géomembranes ont pour particularité de pouvoir se déchirer totalement à partir d'un poinçonnement. On notera également que les impacts sont particulièrement néfastes pour les géomembranes polyéthylène.

3.2.4. Charge due au vent

Le vent peut soulever les géomembranes en cours d'installation, ou en exploitation lorsqu'elles restent exposées. Ces forces de soulèvement sont créées par

la décélération des masses d'air turbulentes, notamment lorsque le profil limite est très irrégulier. Les lignes de flux peuvent alors se séparer, et sous le vent de cette séparation, une onde de tourbillons turbulents se forme et la direction du vent s'inverse. Ceci provoque des forces de soulèvement sur la surface de la géomembrane. Le même résultat peut être provoqué par le vent s'engouffrant sous la géomembrane. Si ces forces sont beaucoup plus importantes par rapport au poids de la géomembrane et à ses ancrages, qu'ils soient temporaires ou définitifs, celle-ci sera soulevée et déplacée. Elle pourra alors être déchirée ou fortement endommagée par des contraintes excessives.

Pour un maintien à court terme, en fonction de la vitesse du vent, la géomembrane peut être lestée sur le parement du barrage par l'intermédiaire de sacs de sable, de pneus, de blocs de béton etc. ou bien fixée provisoirement par des lignes ou points d'ancrage mécanique. L'ancrage en crête est recommandé, même temporairement.

Dans les dispositifs exposés, l'étude du système d'ancrage permanent doit prendre en compte le soulèvement par le vent. Les forces de soulèvement dépendent de la vitesse du vent. Le Tableau 22 qui suit illustre la dépression maximum théorique « P » sur une surface plane, en fonction de la vitesse du vent « V ».

Tableau 22
Dépression en fonction de la vitesse du vent

v [km/h]	20	40	60	80	100	140	180
P [Pa]	20	80	170	310	480	920	1520

La dépression à prendre en compte pour le calcul de l'ancrage permanent doit partir de la dépression théorique et des conditions réelles sur site (topographie, direction du vent, altitude, facteur de réduction dû à l'inclinaison des pentes) qui vont venir moduler la vitesse du vent. L'approche, les méthodes de calcul et les facteurs de réduction varient avec les auteurs. Une étude aérodynamique pour évaluer la dépression réelle provoquée par le vent s'avère judicieuse pour éviter de prévoir un ancrage permanent trop important.

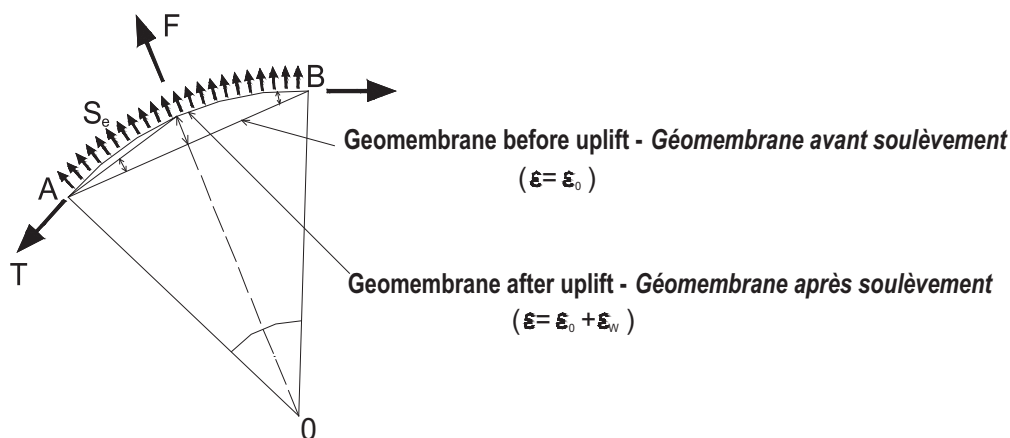


Fig. 29
Calcul des forces de dépression



Fig. 30

Réservoir d'Okinawa, Japon. Effet des dépressions dues au vent sur une géomembrane exposée fixée sur des lignes continues. Photo prise pendant un typhon, vitesse du vent supérieure à 175 km/h

Quel que soit le système d'ancrage, il est recommandé de stabiliser la géomembrane le plus tôt possible.

3.2.5. Vagues dans le réservoir

L'action dynamique des vagues peut, par sa répétition, déformer une géomembrane exposée, provoquant des effets de fatigue pour certaines propriétés de certains matériaux, et des contraintes de tension par aspiration.

Les vagues peuvent également déplacer la couche de couverture, voire détruire la couche support, et affaiblir l'ancrage. Le dispositif peut alors subir des contraintes excessives, et la géomembrane peut finir par être détruite.

Pour éviter ce type de dommage, l'ancrage doit être suffisamment résistant, et la couche de couverture comporter des pierres dimensionnées pour résister à l'action des vagues.

Dans les barrages en remblai avec une géomembrane exposée et une couche indépendante de géotextile, l'action des vagues peut provoquer un lavage de la pente et entraîner la rupture du géotextile qui se détache de son ancrage et glisse en général en s'accumulant au fond du réservoir, tandis que la géomembrane flotte à la surface de l'eau, sans support, et les risques pour l'ouvrage augmentent. Une fois encore, en résistant mieux à l'action des vagues, les géocomposites présentent un avantage. L'action des vagues peut avoir un impact sur les caractéristiques de la géomembrane, par exemple en extrayant les plastifiants des PVC (voir également 3.3.2. « Rayonnement ultraviolet »).

3.2.6. Glace dans le réservoir

La glace n'adhère pas aux géomembranes non poreuses et lisses, ce qui limite énormément d'éventuelles forces de cisaillement. Les blocs de glace flottant dans la zone de fluctuation du niveau de l'eau peuvent endommager les géomembranes fines exposées en les poinçonnant par action dynamique. Les géomembranes robustes et épaisses exposées des barrages poids ou barrages en remblai, et fortement soumises à l'action de la glace n'ont pas été affectées, même lors de la vidange. Les essais en laboratoire d'Hydro Québec ont confirmé les résultats sur le terrain. Pour les petits réservoirs, lorsque la baisse du niveau de l'eau est rapide, le risque de détérioration sur les surfaces inclinées ou horizontales (risbermes, pied) est plus important.



Fig. 31 à 35

En haut à gauche, le barrage en maçonnerie de Camposecco, Italie, 1993 : l'impact de la glace n'a pas endommagé la géomembrane PVC d'une épaisseur de 2,5 mm. En haut à droite, barrage en enrochement à parement béton de Midtbotnvatn, Norvège 2004 : la géomembrane exposée d'épaisseur 2,5 mm pendant l'installation sur la partie inférieure, la plus ancienne du barrage. En hiver, à Midtbotnvatn, plusieurs couches de glace s'accrochent aux dalles de béton supérieures non revêtues, et surplombent le sommet de la section revêtue. Lorsque la température évolue, des blocs de glace formés de plusieurs couches, de 50 à 80 cm d'épaisseur, se détachent et tombent sur la géomembrane. La chute des blocs de glace n'a pas endommagé la géomembrane exposée, mais a affecté les profilés acier de fixation qui dépassent de la surface.

En présence de glace épaisse sur un parement amont équipé d'une géomembrane exposée, une grande attention doit être prêtée au système de fixation. La glace peut en effet se déplacer en suivant les variations de niveau du réservoir, ou en glissant le long des appuis. Dans ce cas les systèmes de fixation des géomembranes exposées à la glace doivent être bien dimensionnés, car s'ils opposent une résistance au mouvement de glissement de la glace, ils peuvent être affectés ou endommagés.

L'impact des glaces flottantes peut être réduit par une couche de couverture sur la surface. Lors de sa formation, la glace n'adhère pas à la géomembrane, et des dispositifs de bullage souvent utilisés pour éviter la formation de glace sur les surfaces de béton, ne sont pas vraiment nécessaires pour les dispositifs d'étanchéité par géomembrane exposées.

3.2.7. Soulèvement par l'eau ou par l'air

Le soulèvement par l'eau peut survenir au cours d'une vidange rapide, si le matériau du barrage formant le support est saturé pour une raison ou pour une autre (niveau aval élevé, fuites, etc.) et qu'aucun drainage n'a été prévu derrière la géomembrane. L'échauffement du dispositif d'étanchéité par le rayonnement solaire peut provoquer un soulèvement sous l'effet de la vapeur d'eau issue de l'humidité naturelle du barrage. L'air emprisonné derrière la géomembrane peut produire un soulèvement, soit lorsqu'il est échauffé, soit à la suite d'une chute brusque de pression atmosphérique.

Un système de drainage adapté et ventilé sur le parement et sous la géomembrane permet d'éviter ces pressions de soulèvement qui pourraient le cas échéant provoquer des tensions et former des bulles sous la géomembrane.

Si la géomembrane est utilisée comme un tapis qui s'étend au delà du pied du barrage dans le lit du réservoir, elle peut emprisonner des poches d'air ou de gaz en raison de la décomposition des matières organiques et des variations du niveau de la nappe phréatique. Des dispositions doivent être prises pour recueillir ces gaz et les éliminer aux points hauts.

3.3. ATTAQUES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES

Des attaques physiques, chimiques et biologiques s'exercent sur le DEG lorsque le réservoir est en exploitation.

3.3.1. Chaleur

Les caractéristiques mécaniques des géomembranes varient avec la température : lorsque celle-ci est élevée, la géomembrane se détend et perd en élasticité. Ceci ne concerne pas seulement les géomembranes exposées, mais celles qui sont couvertes.

Les géomembranes sont soumises à une alternance de dilatations et de contractions dans les climats chauds. Ceci peut créer des plis, diminuer le frottement entre la géomembrane et son support, et provoquer des contraintes en traction sur les joints. Ce problème est particulièrement important dans les zones de variation de niveau du réservoir, et pour les barrages qui sont régulièrement vidés, et pour lesquels le réservoir ne joue plus le rôle de barrière thermique. Les chocs thermiques entraînés par la baisse de niveau peuvent augmenter les risques de fissuration sous contrainte, dans les géomembranes concernées de type PEHD. L'influence de la chaleur doit être prise en compte lors du choix des matériaux adaptés à des conditions spécifiques sur site, et lors des études du système de joints.

La sensibilité à la chaleur ne concerne pas les géomembranes de faible coefficient de dilatation thermique (comme le PVC), mais surtout les géomembranes qui ont un fort coefficient d'expansion thermique comme les géomembranes PEHD. Les géocomposites formés par une géomembrane laminée sur un géotextile offrent les meilleures performances en termes de stabilité thermique. Le renforcement par géogrille peut aussi être avantageux en termes de contrôle de dilatation.

Dans les régions soumises à un rayonnement solaire intense, une attention particulière doit être donnée à l'installation des géomembranes thermoplastiques, car la formation d'ondulations, de rides ou de plis peut perturber la mise en place correcte de la couche de protection.

3.3.2. Rayonnement ultraviolet

Tous les matériaux synthétiques, en raison de leur nature organique, souffrent des processus de dégradation engendrés par le rayonnement ultraviolet solaire, qui

peut détruire la structure moléculaire de la géomembrane. La plupart du temps, la dégradation dans tous les matériaux se traduit par un allongement réduit à la rupture, une résistance moindre aux températures basses, aux impacts dynamiques, au poinçonnement statique, au cisaillement sur les joints en raison de la rigidité accrue du matériau, etc. En général, c'est dans les géomembranes PVC que l'on constate la plus grande diminution de proportion de plastifiant. Il a été démontré que les géomembranes courantes fabriquées avec des plastifiants de haute qualité et de bons absorbants de la lumière ultraviolette se comportent mieux dans les zones exposées au rayonnement que dans les zones de variation du niveau d'eau, ou les zones toujours immergées. La raison pourrait être la perte de ces additifs en raison de deux phénomènes : migration – le plus courant – et lessivage. Si les plastifiants sont de bonne qualité, le lessivage (en raison de l'action de l'eau) est plus important que la migration. C'est pourquoi, pour les applications sur les ouvrages hydrauliques, des plastifiants adaptés doivent être choisis pour bien résister à au lessivage par l'eau en cas d'immersion.

Les dommages provoqués par les ultraviolets peuvent être atténués par une formulation adaptée des géomembranes comprenant des additifs résistants aux UV. L'historique de certaines géomembranes PVC, avec des additifs de protection contre les UV et exposées depuis plus de 30 ans, démontre la bonne résistance de celles-ci aux UV. Les géomembranes les plus épaisses ont des performances meilleures en raison de la masse plus importante d'additifs.

Dans l'hémisphère nord, l'action du rayonnement ultraviolet est plus conséquent sur les rives nord du réservoir, c'est-à-dire celles qui sont orientées directement vers l'équateur. Cet état de fait concerne tous les matériaux thermoplastiques.

Une couche de couverture peut supprimer tout problème dans les environnements particulièrement agressifs. Cette couche de couverture peut d'ailleurs être constituée d'une géomembrane sacrifiée.

3.3.3. Composants dans l'eau

La compatibilité entre les matériaux du DEG et d'éventuels polluants accidentels dans le réservoir et le bassin-versant, de type hydrocarbures ou acides en provenance de la décomposition de matériaux organiques est une préoccupation annexe pour les géomembranes. Il est toutefois nécessaire de mentionner que l'action de l'eau contaminée par certains hydrocarbures peut considérablement affecter les géomembranes de type thermodurcissable présentées dans le Tableau 3.

Les contaminants de l'eau dans les réservoirs de stériles ou dans les réservoirs d'eau usée peuvent entraîner des problèmes importants, et chacun de ces contaminants doit être considéré séparément. Il ne faut pas oublier non plus que les eaux contenant des substances alcalines ou tensioactives (eaux recyclées) peuvent favoriser les phénomènes de fissuration sous contrainte dans les géomembranes PE.

Les solvants et adhésifs qui sont les plus sensibles aux contaminants dans l'eau du réservoir ne sont plus utilisés pour les soudures.

3.3.4. Action biologique (micro-organismes)

Des micro-organismes potentiellement agressifs peuvent pré-exister dans le remblai ou la fondation ou se développer dans le réservoir. La possibilité de croissance de micro-organismes sur la géomembrane existe. Si elle n'entraîne pas de dégradation des propriétés et fonctions de celle-ci, elle peut affecter l'apparence de la surface et devra être prise en compte.

La résistance aux micro-organismes peut être obtenue grâce à des additifs supplémentaires. Leur qualité et quantité dépendront de la qualité des eaux stockées.

Des cas isolés d'action de certains micro-organismes ont été détectés, provoquant des taches caractéristiques en surface de la géomembrane, et entraînant une dégradation remarquable des caractéristiques mécaniques. Le contenu en plastifiant du PVC n'a pas été affecté.

3.3.5. Végétation

La résistance de la géomembrane à la croissance de la végétation est semblable à celle d'autres matériaux de type béton, bitumineux ou non. Les géomembranes polymères sont plus résistantes que les géomembranes bitumineuses. La croissance de végétation ne concerne en général que les barrages en remblais et les raccordements aux appuis.



Fig. 36

Croissance de la végétation sur une géomembrane bitumineuse (stade ultime)

Pour les DEG installés depuis un certain temps, lorsque le vieillissement s'est déclenché, certains végétaux ont pu perforer la géomembrane, même si celle-ci était conforme au départ avec les normes de résistance aux racines. Les géomembranes bitumineuses sont moins résistantes à ce type de pathologie.

3.3.6. Faune

D'après ce que l'on sait, les rongeurs ont rarement attaqué des géomembranes sur les ouvrages de rétention d'eau. En effet, ils n'essaient de traverser une

géomembrane que s'ils sont piégés en dessous, ou s'il se trouve de la nourriture de l'autre côté.

Dans certaines situations, les rongeurs peuvent attaquer les géomembranes (thermoplastiques aussi bien que thermodurcissables), si elles sont homogènes, c'est à dire sans renforcement. L'insertion de fibres de verre ou le doublage par un géotextile entrave théoriquement l'action de ces animaux.

Parmi les animaux qui peuvent entraîner des problèmes sur les géomembranes, on citera principalement les renards qui sont capables de perforer la géomembrane et d'arracher avec leurs griffes le géotextile de la couche support.

3.3.7. Vandalisme

Le vandalisme ne concerne que les géomembranes exposées. Il s'agit d'actes difficiles à éviter et à prévoir, pouvant se manifester de multiples manières et donc compliqués à contrôler, quantifier voire simplement décrire. Il peut s'agir simplement de projection d'objets (pierres, morceaux de bois, pneus) mais cela peut aller jusqu'à l'élimination de voitures volées. Les actions les plus courantes consistent, après avoir forcé l'accès au réservoir, à l'utiliser comme une piscine, un terrain pour le skating ou encore pour la moto, ou bien comme zone de chasse ou de pêche, avec les dommages associés à ces activités. Le vol de géomembranes pour d'autres utilisations comme la couverture de toits est également possible dans les régions pauvres du globe.

Les zones accessibles à pied sec par d'éventuels vandales peuvent être protégées par des barrières physiques (clôtures) et/ou par une surveillance. L'accès en bateau, les dommages causés par des tirs sont moins susceptibles de se produire. Si le vandalisme se révèle un souci majeur, il peut être rendu impossible par une couche de couverture sur les parties accessibles de la géomembrane. Une couverture lourde (béton) ou légère (béton projeté, plaques d'acier, câbles d'acier) peut être envisagée.

Une géomembrane exposée peut être soumise au vandalisme s'il est possible d'y accéder. Mais dans cette situation, il est également possible d'effectuer une réparation rapide et facile à très faible coût. Le coût de l'installation d'une couche de couverture n'est pas forcément justifié uniquement par les risques de vandalisme.

4. GÉOMEMBRANES POUR LA CONSTRUCTION ET LA RÉHABILITATION DE BARRAGES EN REMBLAI

La base de données présentée dans ce Bulletin comprend un total de 183 barrages en remblai équipés d'un dispositif d'étanchéité par géomembranes (DEG), et pour plus de 150 barrages parmi ces 183, des informations détaillées sont disponibles. Ce chapitre traite simultanément de l'utilisation de géomembranes amont pour la construction et la réhabilitation de barrages en remblai, car les principes de conception et les techniques d'installation sont pratiquement similaires.

Les DEG présentant une géomembrane positionnée de manière interne, comme pour 20 des 174 barrages pour lesquels la position de la géomembrane est connue, sont brièvement traités à la fin du chapitre, avant la section concernant la mise en place.

4.1. GÉNÉRALITÉS

Dans les barrages en remblai, l'étanchéité est assurée par un matériau différent de celui du corps du barrage. La barrière à l'infiltration d'eau a été réalisée traditionnellement à partir de matériaux naturels ou artificiels permettant la construction d'un noyau imperméable, notamment les noyaux en béton bitumineux et les noyaux argile, ou encore un parement amont imperméable comme dans les barrages en enrochements à parement béton, ou encore les parements en béton bitumineux. Les matériaux d'étanchéité artificiels de type géomembranes et géocomposites sont une solution qui peut s'imposer comme l'unique option dans les cas où des matériaux naturels d'étanchéité sont soit absents, soit inadaptés, soit très chers ou difficiles à fournir et/ou à installer. La géomembrane forme la partie imperméable du barrage, et toutes les considérations concernant le drainage, les sous-pressions, la stabilité etc. applicables pour la conception d'un système d'étanchéité (noyau argile, noyau béton bitumineux, barrage en enrochements à parement béton, etc.) sont à examiner

Tableau 23
Utilisation mentionnée de géomembranes dans des barrages en remblai*

	Total	Amont		Interne
		Amont Exposées	Amont Couvertes	
Nombre total de barrages en remblai	174	47**	106	20
Nombre total de nouvelles constructions	103	22	66	15
Nombre total de réhabilitation	56	21	31	5
Nouvelle construction ou réhabilitation non mentionnée	14	5	9	0

* Les nombres mentionnés dans le Tableau concernent les barrages en remblai dont la position de la géomembrane est connue. Pour 9 autres barrages en remblai mentionnés (au total 183 barrages en remblai), la position de la géomembrane n'est pas donnée. Le Tableau comprend 43 barrages en Chine, et 5 barrages de stériles.

** Y compris 1 barrage dont la géomembrane n'est que partiellement exposée.

également pour une géomembrane. Même si les couches immédiatement en dessous et au dessus de la géomembrane sont spécifiques au DEG, dans tous les cas, comme pour tout matériau d'étanchéité, la conception du DEG doit être effectuée en conjonction avec la conception d'ensemble, la stabilité et la sûreté du barrage.

Le dispositif d'étanchéité par géomembranes peut être installé comme :

- Système amont, soit exposé, soit couvert,
- Système interne.

4.1.1. Dispositif amont

La solution adoptée le plus fréquemment est le « dispositif amont », qui voit la géomembrane disposée sur le parement amont du barrage en remblai, soit exposée, soit couverte.

Dans le dispositif amont, tout le poids mort du remblai supporte la charge hydraulique, le poids de l'eau du réservoir stabilise la partie amont du barrage, il n'existe pas de pression interstitielle ou de percolation à prendre en compte pour la conception dans l'ensemble du corps du barrage : le dispositif amont maximise la sécurité de l'ouvrage, car il offre une stabilité maximale en l'absence de pression interstitielle excessive dans le remblai.

Un dispositif d'étanchéité par géomembranes amont peut raccourcir significativement le calendrier de construction. Son installation n'est que très peu influencée par les conditions météorologiques. L'installation peut être étagée, de manière à s'adapter au calendrier de construction du corps du barrage, ce qui raccourcit la période de construction. Ainsi, la géomembrane peut être installée sur la partie inférieure du barrage tandis que la mise en place du remblai continue en partie supérieure. Cependant, il faudra dans ce cas prévoir des fixations supplémentaires et porter une grande attention au risque de chute de pierres depuis la partie supérieure. L'avantage est alors une étanchéification précoce de la partie inférieure du barrage, réduisant ainsi les besoins d'ouvrages temporaires (hauteur du batardeau, galerie de dérivation).

Lorsque le dispositif d'étanchéité par géomembranes est mis en place par des contractants spécialisés, un haut niveau de qualité peut être atteint.

Non seulement le dispositif par géomembrane permet d'économiser des matériaux, mais le temps de construction est inférieur à celui nécessaire, par exemple, pour un revêtement béton. Voici quelques exemples de dispositifs amont : Bovilla (Albanie), Figari (France), Jibiya (Nigeria), La Galaube (France), Ospedale (France), Contrada Sabetta (Italie).

En exploitation, la position amont du dispositif d'étanchéité par géomembrane permet des réparations pratiques et économiques, même s'il faut enlever la couche de couverture dans le cas d'une géomembrane couverte.

Le désavantage du dispositif amont est une surface d'étanchéité plus grande que la section verticale de la vallée, soumise à des contraintes externes et demandant souvent une stabilisation par ancrage ou par ballastage.

Son avantage est l'accès au système d'étanchéité pour la réparation ou le remplacement, plus ou moins facile suivant la présence ou non d'une couche de couverture.

Le dispositif amont autorise l'utilisation de deux groupes principaux de dispositifs d'étanchéité par géomembrane :

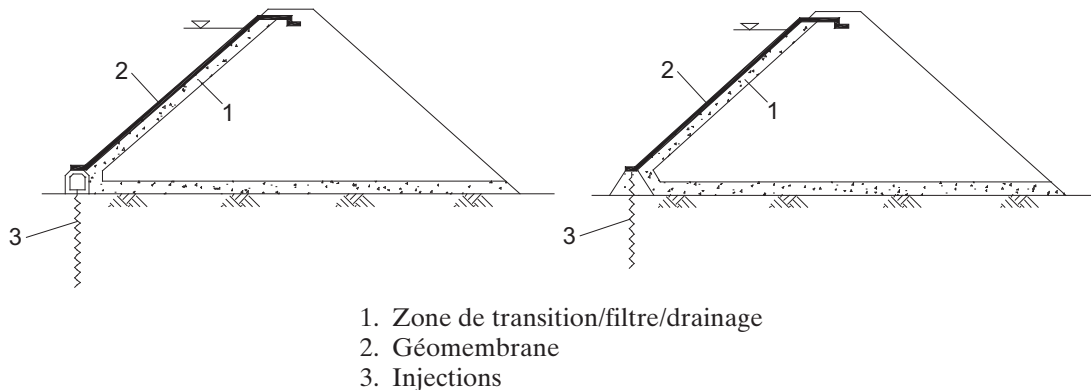
- Les dispositifs d'étanchéité exposés,

- Les dispositifs d'étanchéité couverts.

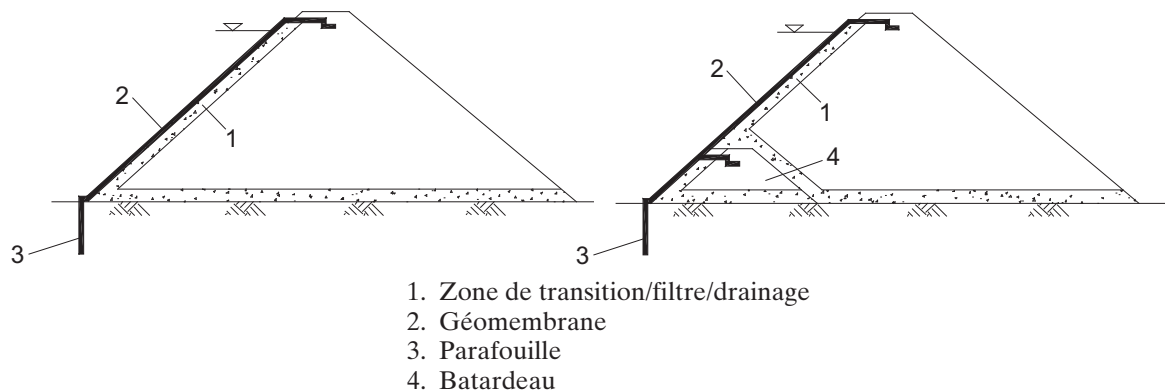
Dans les deux cas, les principales exigences pour le système d'étanchéité par géomembranes sont :

- L'étanchéité fournie par la géomembrane,
- Son raccordement étanche à la fondation du barrage et à tout ouvrage béton en limite ou pénétrant le dispositif,
- Une certaine élasticité pour s'ajuster aux déformations du corps du barrage en raison du tassement,
- Le recouvrement des joints structuraux,
- Un système d'ancrage pour maintenir la géomembrane en place (ancrage ou ballast),
- La mise en place d'un système de drainage derrière la géomembrane pour intercepter les fuites à travers le dispositif, pour éviter les sous-pressions et pour surveiller l'étanchéité du dispositif.

Le dispositif amont a été utilisé dans une grande diversité de configurations et de conditions, comme présenté de manière conceptuelle dans la Fig. 37 et le Tableau 24 qui suivent. Une combinaison des différentes options a également été utilisée.

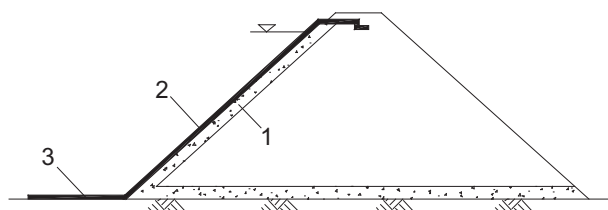


a) Géomembrane raccordée au rideau d'injection. Exemples : Moravka (République tchèque), Winscar (Royaume Uni), Bovilla (Albanie).



b) Géomembrane raccordée au rideau parafouille. Exemples : Symvoulos (géomembrane ancrée sur tranchée du parafouille béton, Chypre), Jibiya (géomembrane ancrée à un parafouille auto-durcissant, Nigeria).

Fig. 37
Géomembranes amont exposées dans les barrages en remblai

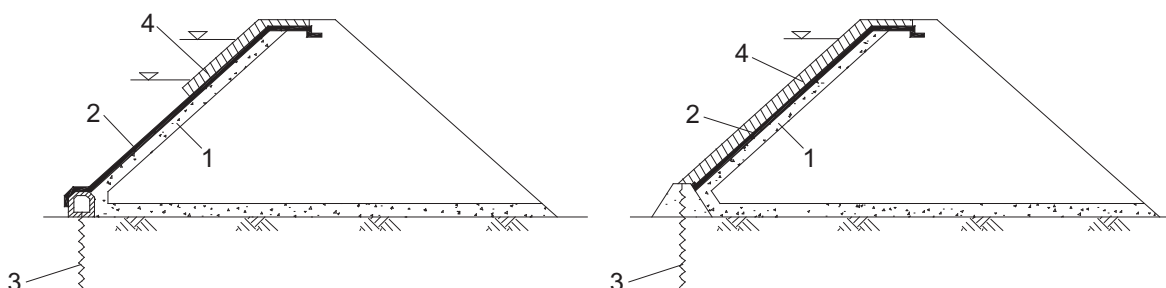


1. Zone de transition/filtre/drainage
2. Géomembrane
3. Géomembrane d'étanchéité en amont

c) Géomembrane s'étendant en amont sur le fond du réservoir. Exemples: Pian del Gorghiglio (Italie), Kyjiche Ujezd (République Tchèque), Goronyo (Nigéria, barrage secondaire).

Fig. 37 (suite)

Tous les dispositifs de la Fig. 37 peuvent être installés en position exposée ou en position couverte.



1. Zone de transition/filtre/drainage
2. Géomembrane
3. Injections
4. Couverture partielle uniquement dans les zones de marnage

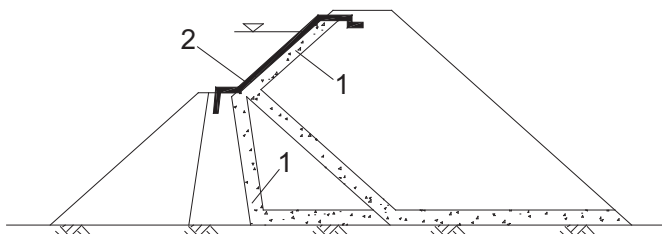
1. Zone de transition/filtre/drainage
2. Géomembrane
3. Injections
4. Couverture totale

Fig. 38

Géomembranes amont couvertes sur les barrages en remblai

Les dispositifs ci-dessus sont adaptés à la construction par étapes (batardeaux noyés dans le barrage principal, barrages de stériles) et à la surélévation de barrages. Exemples : Cerro do Lobo (Portugal), Cowarra Creek et Cracow (Australie), Lindley Wood (RU).

Les géomembranes exposées ou couvertes peuvent présenter différentes caractéristiques, car les exigences s'appliquant aux géomembranes exposées sont plus fortes.



1. Zone de transition/filtre/drainage
2. Géomembrane

Fig. 39

Géomembranes amont pour la surélévation de barrages en remblai avec noyau en argile

4.1.1.1. Dispositif de géomembranes exposées

Au moment de la publication du Bulletin 78 en 1991, le dispositif de géomembranes couvertes était qualifié de dispositif le plus moderne pour les barrages en remblai, bien que des géomembranes non couvertes aient été prises en considération pour des supports rigides.

À la suite de l'utilisation de géomembranes sur des barrages béton, ces dernières ont été considérablement améliorées au niveau des résines et des additifs pour permettre une résistance élevée aux UV. Une géomembrane exposée est donc désormais une option parfaitement envisageable pour un barrage en remblai. À l'heure actuelle, des dispositifs exposés et couverts sont utilisés pour les barrages en remblai (47 exposés, 106 couverts, 20 internes).



Fig. 40

Moravka, République Tchèque, 1999. Réhabilitation du parement en béton bitumineux, 25 400 m². Géocomposite PVC exposé de 2,5 mm d'épaisseur ancré par des lignes de tensionnement, ayant résisté à une crue de 500 ans de retour. Taux de fuite inférieur à 2 l/s

Tableau 24
Installations de géomembranes amont sur des barrages en remblai*

Uniquement dispositif amont	TOTAL exposées + couvertes	Exposées	Couvertes
Installation	174	47	106
Installation la plus grande [m ²]	165 000	30 000**	165 000***
Barrage le plus élevé [m]	101 (Salt Springs, États-Unis), barrage complet 198 (Karahnjukar, Islande), mur de pied et joint horizontal	101 (Salt Springs, États-Unis)	91 (Bovilla, Albanie), parement amont - 198 (Karahnjukar, Islande), mur de pied et joint
Installation la plus ancienne en	1959 (Contrada Sabetta, Italy)	1973 (Banegon, France)	1959 (Contrada Sabetta, Italy)

* Les membranes imprégnées sur site ne sont pas comprises.

** Uniquement sur le barrage. Les installations pour lesquelles une géomembrane s'étend sur le fond du réservoir atteignent un maximum de 120 000 m².

*** Uniquement sur le barrage. Les installations pour lesquelles une géomembrane s'étend sur le fond du réservoir atteignent un maximum de 1 200 000 m².

Dans les nouvelles constructions, les atouts d'un dispositif par géomembrane exposée comprennent la construction plus facile du corps du barrage et l'installation plus aisée du dispositif, un accès plus facile pour la réparation de la géomembrane en cas de fuite non prévue, la possibilité d'une inspection visuelle de la géomembrane et des coûts de construction peu élevés. En réhabilitation, l'utilisation d'une géomembrane exposée offre l'avantage d'une mise hors service moins longue.

Les inconvénients d'un dispositif par géomembrane exposée est la durée de vie moindre de la géomembrane en raison des influences environnementales, y compris le rayonnement UV. Le système peut être endommagé de manière mécanique par vandalisme, action de la glace et par des objets aigus jetés de la crête ou des appuis du barrage. Si elles ne sont pas soigneusement étudiées, les géomembranes exposées sont soumises aux forces de soulèvement provoquées par le vent et les vagues.

Pour permettre de maintenir une géomembrane exposée sur la surface du barrage, il est nécessaire de l'ancrer à sa périphérie et à la surface.

4.1.1.2. Dispositif par géomembrane couverte

Le dispositif par géomembrane couverte est choisi lorsque les causes de dommages éventuels mentionnées plus haut posent de réels problèmes et lorsque la durée de vie accrue de la géomembrane justifie le coût d'une couche de couverture.

Les atouts d'un dispositif par géomembrane couverte sont le maintien uniforme en position de la géomembrane par le poids de la couverture, et la protection contre les agents extérieurs.

Les inconvénients sont les risques associés à la mise en place de la couche de couverture, l'impossibilité d'accéder à la géomembrane pour les travaux de révision et de réparation, et les coûts de construction plus élevés engendrés par cette couverture. Ce coût doit être comparé à celui d'un ancrage en parement dans le cas d'une géomembrane exposée.

Une couverture partielle peut être envisagée, notamment pour les installations de loisir (Mauriac et Mas d'Armand, France), lorsque celle-ci peut être nécessaire en crête.

La comparaison des avantages et inconvénients des dispositifs amont exposés et couverts est présentée dans le tableau 24, fondé sur les données de la base.



Fig. 41et 42
Moravka, République Tchèque : la glace n'a pas endommagé la géomembrane exposée installée en 1999

Tableau 25
Comparaison des dispositifs d'étanchéité par géomembrane amont

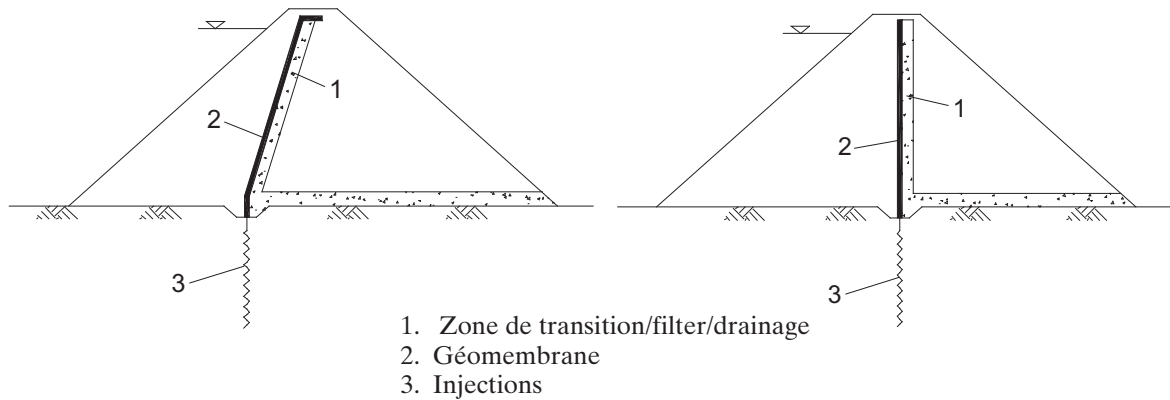
	Amont exposées	Amont couvertes
Risque de dommages pendant la construction	Bas	Élevé
Risque de dommages par la glace en exploitation	Faible à moyen, dépendant de la solidité de la géomembrane*	Aucun
Risque de dommages en exploitation par des débris flottants (y compris plaques de glace)	Faible*	Aucun
Risque de dommages en exploitation par des masses tombant depuis les appuis aux extrémités	Faible	Aucun
Risque de dommages à la couche de couverture	Non applicable	Moyenne
Risque de vandalisme	Élevé	Minimum
Cas de vandalisme rapportés	Aucun	Aucun
Inspection visuelle	Possible	Impossible
Coût des vérifications	Très faible	Moyen à élevé
Possibilité de réparer à sec	Facile	Complicquée
Coût des réparations	Faible	Moyen à élevé
Possibilité de réparation sous l'eau	Facile	Complicquée
Durabilité	Élevé	Extrêmement élevé
Installation du DEG et impact sur l'ensemble du calendrier de construction	Faible	Elevé
Coût (y compris couverture)	Faible	Elevé

* Une section test destinée à vérifier la résistance à des agressions importantes et prolongées par la glace a été installée sur le barrage en enrochement à masque béton de Toulnostouc, Canada, en 2004. Exemples de résistance à la glace : Moravka (République Tchèque 1999), Midtbotnvatn (Norvège 2004), Salt Springs (États-Unis 2004).

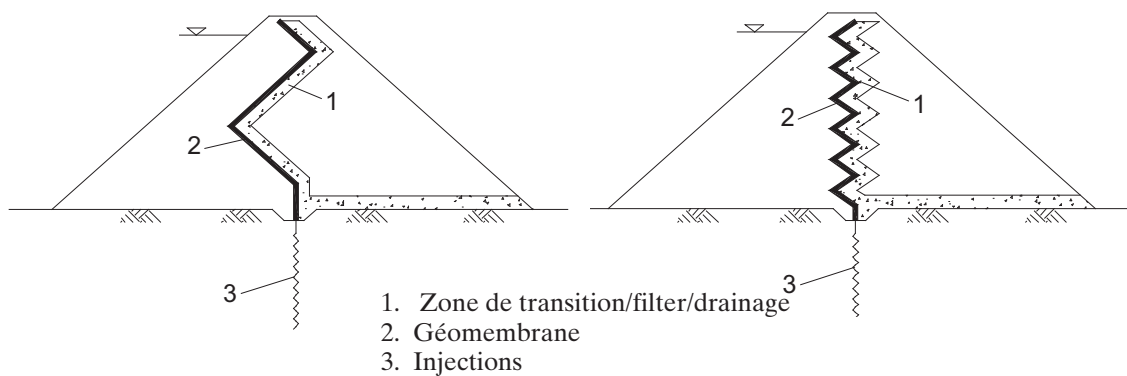
4.1.2. Dispositif interne

La construction d'un nouveau barrage permet d'installer le dispositif d'étanchéité au sein du remblai. L'installation interne du DEG n'est utilisée que dans des circonstances particulières, comme en cas de matériaux de perméabilité moyenne à très faible.

Les dispositifs d'étanchéité par géomembrane interne ont été utilisés dans un nombre limité de cas (20 cas sur un total de 174 barrages pour lesquels la position de la géomembrane est connue, sur un total de 183 barrages en remblai avec une géomembrane). Les informations plus détaillées sont absentes dans les formulaires

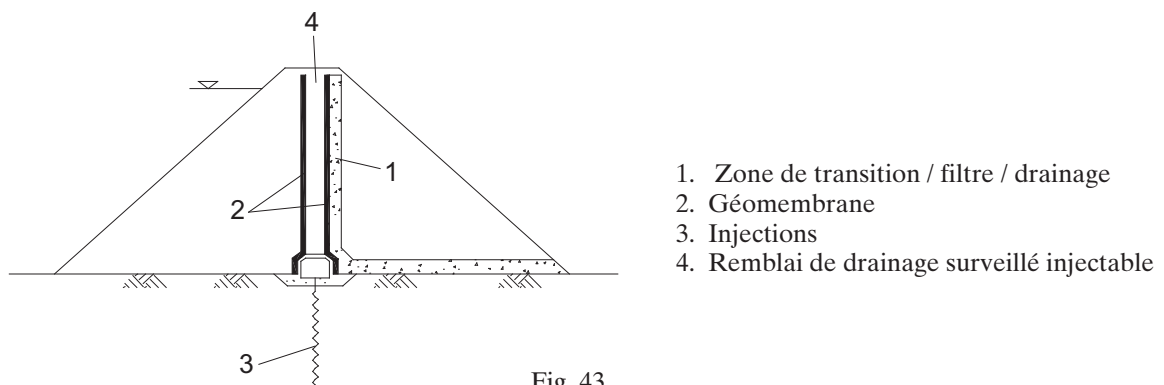


- a) Géomembrane en position inclinée. Exemples : Lidun et Songxiangwu (Chine)
 b) Géomembrane en position verticale. Exemple : Atbashinsk (Kirghizistan)



- c) Géomembrane en zig-zag
 d) Géomembrane en zig-zag

Les deux configurations sont en principe identiques, la seule différence étant la hauteur des levées successives. Exemples : Fencheng et Wantuzhou (Chine).



- e) Évolutions ultérieures envisageables : double géomembrane avec couche de surveillance du drainage et couche intermédiaire pouvant être injectée.

techniques utilisés pour remplir la base de données. L'application d'un dispositif interne sur des barrages très élevés doit être étudié avec une attention particulière, notamment en termes de raccordement avec l'écran étanche, entre le zig-zag et les appuis (cas c) et en termes de contraintes excessives sur les plis de la géomembrane.

Dans la construction de nouveaux barrages avec un noyau central, les géomembranes sont une solution alternative fiable aux noyaux conventionnels en argile ou en béton bitumineux.

L'avantage du « dispositif interne » réside dans la protection de la géomembrane contre les charges mécaniques, physiques, biologiques et chimiques externes. La géomembrane est maintenue en position par le remblai du barrage. La surface de géomembrane mise en place est inférieure à celle de l'option amont. Les désavantages sont constitués par les risques associés à la mise en place du remblai amont et aval. Des techniques récentes permettent désormais de vérifier l'efficacité de la géomembrane et la mise en place, au moment de la construction, de couches de perméabilité élevées immédiatement en aval de la géomembrane. Le choix d'une géomembrane interne implique un zonage plus complexe du remblai, commun à toutes les solutions à noyau central.

Le dispositif interne a été adopté dans de nombreuses configurations et options, comme la Fig. 43 l'illustre. Parmi celles-ci, la configuration e) est une évolution proposée mais qui n'a pas encore été concrétisée.

Malheureusement les auteurs n'ont pas de données concernant le comportement dans le temps de ces aménagements, et les avantages ou inconvénients en cours d'installation.

Les études détaillées en cas de position centrale de la géomembrane doivent traiter les difficultés spatiales pour raccorder le zig-zag à la ligne droite du rideau d'étanchéité et des appuis. Une attention particulière doit être accordée à la réduction des contraintes sur les plis de la géomembrane.

Le dispositif interne s'applique également à la surélévation de barrages existants.

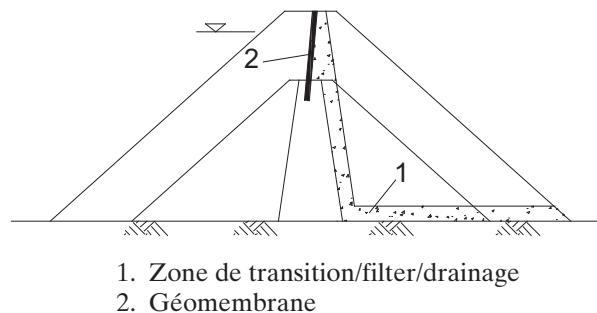


Fig. 44

Géomembranes internes pour la surélévation des barrages en remblai avec noyau en argile

4.2. CHARGES

La conception du dispositif de géomembrane et la sélection des différents matériaux du dispositif doivent prendre en compte les exigences et conditions de charge spécifiques au système en surface du barrage ou au sein du corps de celui-ci.

Dans le cas d'un dispositif de géomembrane couverte, le parement inclut au moins une fine couche au dessus de la structure de l'ouvrage, c'est-à-dire au dessus de la géomembrane. Il peut y avoir d'autres couches, comme des géotextiles sous ou sur la géomembrane, ou des géofiletts ou géo-espaces comme couche de drainage, pouvant être associés ou non à la géomembrane.

Ces couches minces sont considérées comme des interfaces bidimensionnelles caractérisées par :

- Des propriétés contrainte-déformation sous contrainte dans le plan de la couche, en général non linéaires, anisotropiques, et pour certains matériaux dépendantes du temps (fluage) ;
- Une relation contrainte déformation à chaque interface gouvernée notamment par :
 - le frottement en surface des matériaux en contact les uns avec les autres ;
 - l’humidité du matériau ;
 - la pression de l’eau ;
 - la résistance négligeable à la flexion.

La stabilité contre le glissement doit être vérifiée à chaque interface entre deux couches minces adjacentes, entre la couche de support ou la surface du barrage et la géomembrane, entre la géomembrane et la couche de couverture. La stabilité de la couche de couverture (interface entre couverture/géotextile de protection, et les interfaces entre les différentes couches de couverture le cas échéant) doit être évaluée avec soin. Si des glissements se produisent sur certaines interfaces, il existe un risque que la géomembrane soit soumise à des contraintes excessives en traction et se déchire. Des expériences effectuées en France avec des pentes $> 1V/3H$, ont montré certaines difficultés et/ou le besoin de matériaux texturés avec des coefficients de frottement supérieurs.

Dans les barrages en remblai, lorsque le parement comprend une couche de couverture, et alors que les déformations de ce parement peuvent en général être analysées sans prendre en compte la résistance en traction des couches fines, la résistance en frottement à l’interface peut affecter la performance d’ensemble du système, car les couches fines peuvent jouer un rôle de surfaces de glissement préférentielles, pouvant devenir critiques pour la stabilité. Une meilleure résistance de l’interface et un ancrage approprié doivent être apportés. Le coefficient de frottement de l’interface entre la face amont de la géomembrane et la couche géosynthétique placée au dessus de la géomembrane (cas général) doit être le plus faible de l’ensemble du DEG de manière à ce que les déplacements (compactage, mouvement de matériel, etc.) et la composante tangentielle du poids de la structure de couverture ne provoque pas des contraintes en traction supplémentaires dans la géomembrane. Il est donc recommandé que la géomembrane soit mise en place avec la face de coefficient de frottement le plus faible vers le haut. La face présentant le frottement le plus élevé sera donc placé sur la couche inférieure. Par exemple, la face inférieure d’une géomembrane bitumineuse sera la face sablée, et dans le cas d’une géomembrane PVC collée sur un géotextile, ce dernier sera placé vers le bas. Ce point est détaillé et expliqué par l’exemple suivant concernant un dispositif de géomembrane couverte.

Pour une approche simplifiée, les paramètres principaux entrant dans le calcul des forces de tension sur les différents géosynthétiques d’un DEG sont les angles de frottement des interfaces, l’angle de frottement entre deux matériaux permet de calculer la résistance en cisaillement le long de l’interface concernée :

$$\tau = (\sigma - u) \tan \delta , (u = \text{pression de l’eau à l’interface; } u = 0 \text{ pour le présent exemple})$$

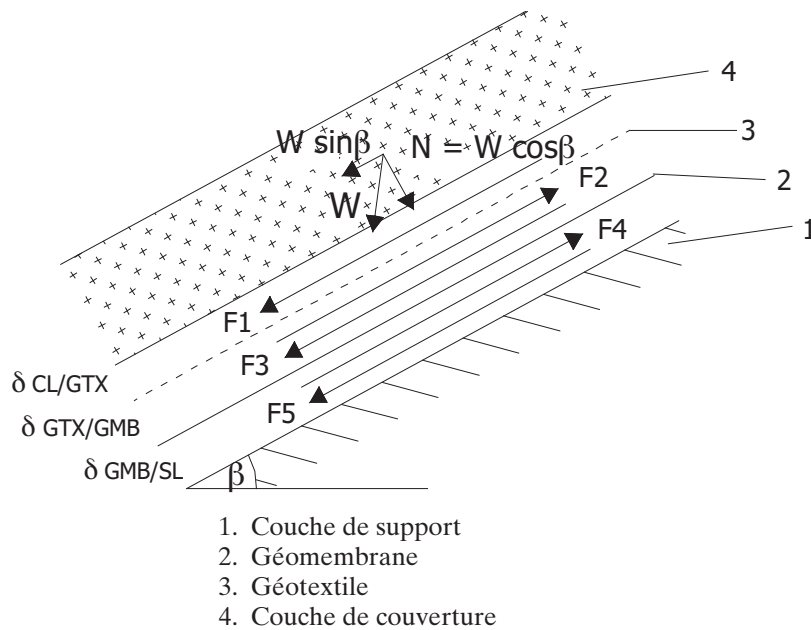


Fig. 45
Analyse des forces dans un DEG amont couvert (Koerner)

Les forces s'appliquant dans le DEG donné en exemple (Fig. 45) sont :

- La force agissante, parallèle à la pente est $W \sin \beta$, W représentant le poids de la couverture et β l'angle de la pente
- Cette force provoque des forces de tension dans les géosynthétiques
- $F1-F2$ = Force de tension dans le géotextile
- $F3-F4$ = Force de tension dans la géomembrane

avec :

- $F1 = N \tan \delta_{CL/GTX}$
- $F2 = N \tan \delta_{GTX/GMB}$ et $F3$ la force opposée à $F2$
- $F4 = N \tan \delta_{GMB/SL}$ et $F5$ la force opposée à $F4$
- $\delta_{CL/GTX}$ = angle de frottement le long de l'interface couche de couverture/ géotextile
- $\delta_{GTX/GMB}$ = angle de frottement le long de l'interface géotextile/ géomembrane
- $\delta_{GMB/SL}$ = angle de frottement le long de l'interface géomembrane/ couche de support

Si $F4 > F3$, ce qui est équivalent à $\delta_{GMB/SL} > \delta_{GTX/GMB}$ et correspond au cas de l'interface la moins résistante placée au dessus de la géomembrane, il n'y a pas de tension dans la géomembrane. Dans tous les cas, l'angle de frottement doit être $> \beta$.

Dans cet exemple, les déformations et déplacements ne sont pas pris en considération.

Si le frottement n'est pas suffisant pour assurer la stabilité de la couche de protection, un système d'ancrage ou de contreforts doit être ajouté.

L'essai sur plan incliné (norme EN ISO 12957-2, 2004) est approprié pour la mesure de frottement sous contrainte normale faible, comme on en trouve dans une couche de protection. Cet essai est complémentaire à celui des boîtes de cisaillement qui est plus approprié aux situations de contraintes plus importantes.

4.3. SYSTÈME AMONT

4.3.1. Généralités

Les principes essentiels qui suivent doivent être pris en compte pour un dispositif d'étanchéité par géomembranes amont :

- La géomembrane doit être protégée contre les dommages provoqués par le poinçonnement dû au contact de couches agressives. La protection peut être fournie par un géotextile.
- Une couche de support doit être présente sous la géomembrane, avec une imperméabilité adaptée à la réduction de l'écoulement de percolation en cas de fuite.
- Un drainage libre adapté doit être mis en place sous la géomembrane et la couche support amortisseur pour éviter la montée en pression hydraulique en cas de fuite.

Les principes sont les mêmes pour tous les barrages en remblai. La couche située entre la géomembrane et le remblai doit avoir :

- des caractéristiques de perméabilité permettant de réduire les sous-pressions
- une distribution granulométrique correspondant aux critères des filtres.

Les détails d'un dispositif d'étanchéité par géomembranes dépendent du type d'application.

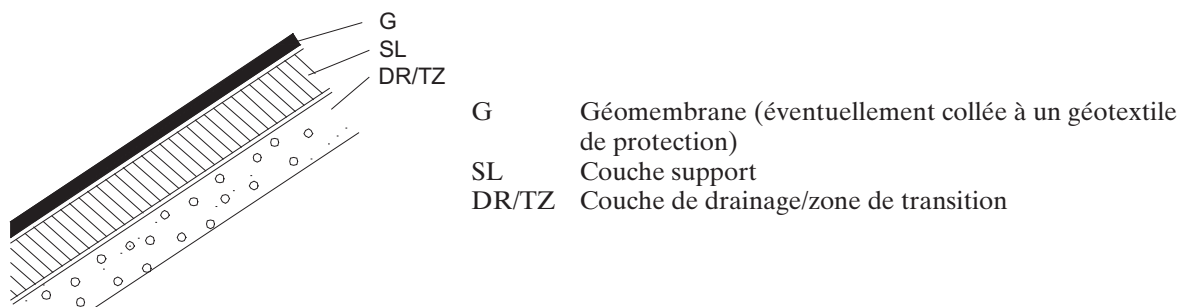


Fig. 46
Différentes couches d'un DEG dans le cas d'une nouvelle construction

DR/TZ dépend du type de barrage. Pour les barrages en remblai de faible perméabilité, et les barrages semi-perméables en sable et graves, il doit y avoir une couche de drainage, alors que dans un barrage perméable en enrochement, la zone de transition peut jouer le rôle d'une couche de drainage pour le DEG.

Dans le cas de la réhabilitation d'un barrage présentant un dispositif d'étanchéité amont endommagé, le DEG est installé sur une surface qui avait initialement une faible perméabilité (béton, béton bitumineux), mais qui à la suite de sa détérioration est devenu plus perméable. La couche de drainage varie suivant

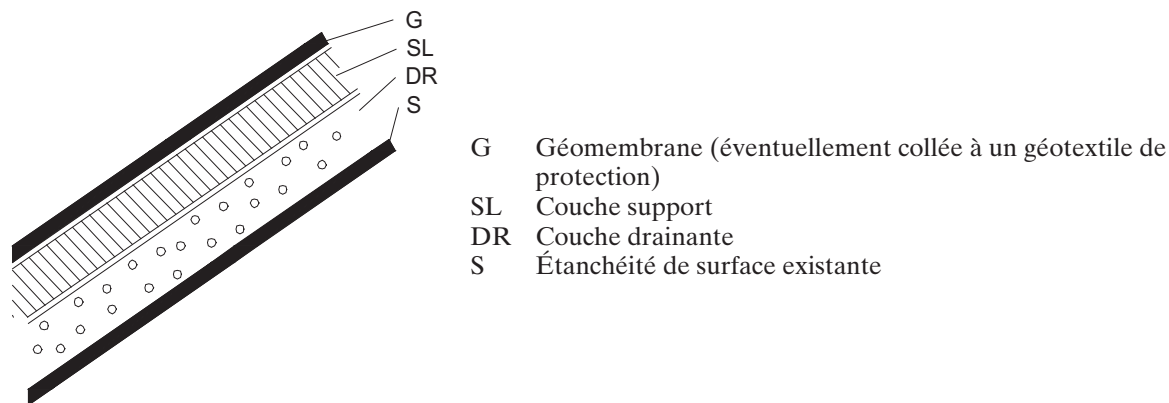


Fig. 47
 Différentes couches du DEG en cas de réhabilitation

le degré de détérioration de l'ancien dispositif d'étanchéité. Si un nouveau DEG est nécessaire, c'est parce que la couche existante est déficiente et donc peut jouer le rôle d'un système de drainage.

DR peut être un matériau synthétique de type géodrain ou géo-espaceur.

Il n'existe pas de limite théorique de pente pour un dispositif d'étanchéité par géomembranes sur un barrage en remblai. La limite est donnée par la capacité à mettre en place une couche de support sans ségrégation. Les DEG exposés se maintiennent sur la pente par frottement et par ancrage additionnel, tandis que les DEG couverts sont maintenus en place par le poids de la couche de couverture.

Les exemples qui suivent détaillent les fonctions et matériaux de toutes les couches, et concernent des dispositifs exposés et couverts. Le Tableau 26 donne un exemple de matériaux adaptés (C2 et C3 peuvent être remplacés par des dalles béton, S1 ou S2 peuvent ne pas être nécessaires,...) pour donner une meilleure connaissance des DEG.

Exemple 1 : cas d'un nouveau barrage en terre (voir Tableau 26 pour fonction et type des couches).

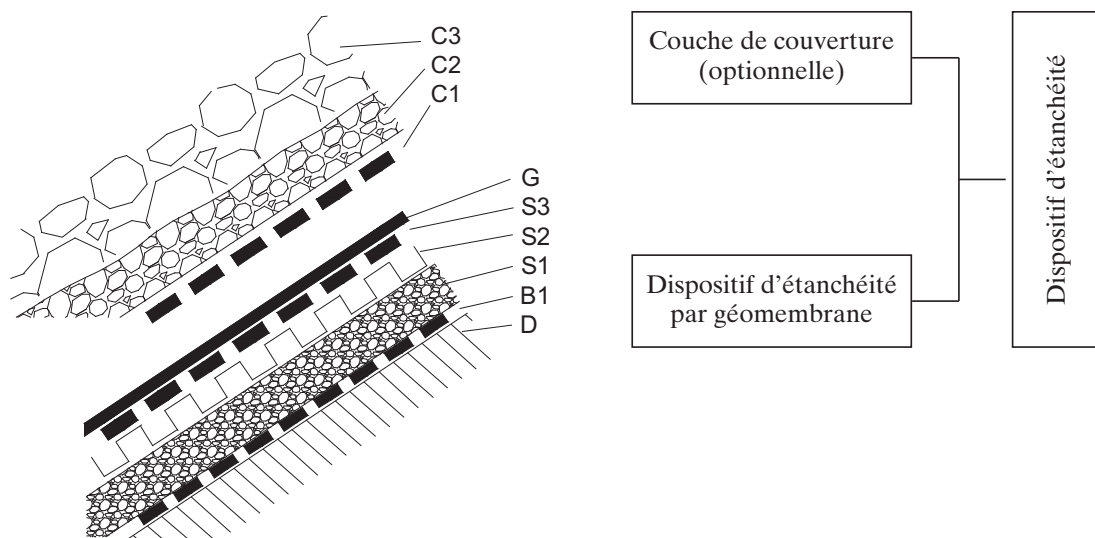


Fig. 48
 Nouveau barrage en terre
 D : corps de barrage

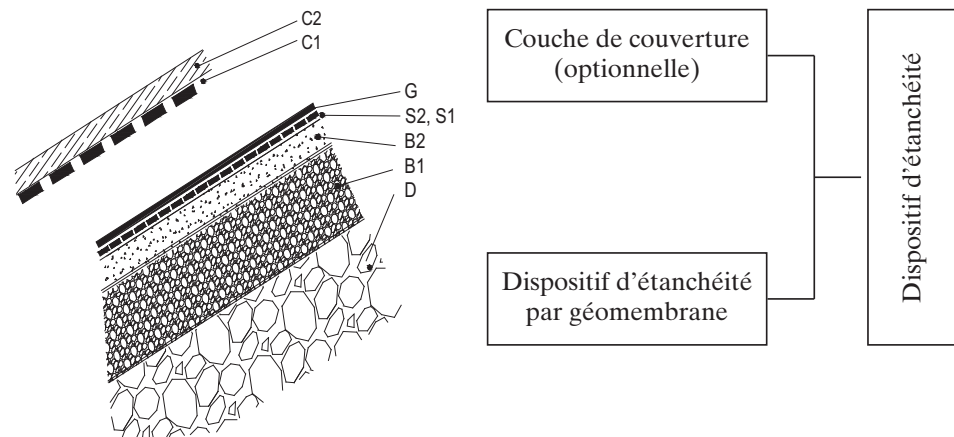
Tableau 26
Fonctions et types des différentes couches

Numéro	Fonction	Matière
C3	Protection mécanique	Enrochement de protection, béton
C2	Raccordement	Granulats (0/25)
C1	Anti-poinçonnement	Géotextile épais
G	Étanchéité	Géomembrane
S3	Anti-poinçonnement	Géotextile épais
S2	Drainage	Matériau de drain ou géoespaceur
S1	Drainage, support	Granulats (0/25 mm)
B1	Filtration	Géotextile

Les ouvrages « Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets (Fascicule N° 11- CFG 1195) » et « Designing with Geosynthetics » (R. M. Koerner 2005) sont de bons exemples de conception fonctionnelle.

La Fig. 48 donne juste un exemple pour illustrer la conception fonctionnelle (C2 et C3 peuvent être remplacés par des dalles de béton dans cet exemple, S1 ou S2 peuvent ne pas être nécessaires).

Exemple 2 : nouveau barrage en enrochements, géomembrane couverte.



- C2 : Dalles béton
- C1 : Géotextile
- G : Géomembrane
- S2 : Géotextile (optionnel)
- S1 : Béton bitumineux (optionnel)
- B1, B2 : Couches de transition (granulats)
- D1 : Corps de barrage (enrochement)

Fig. 49
Nouveau barrage en enrochement

Exemple 3 : réhabilitation d'un barrage en enrochement à masque en béton avec géomembrane couverte.

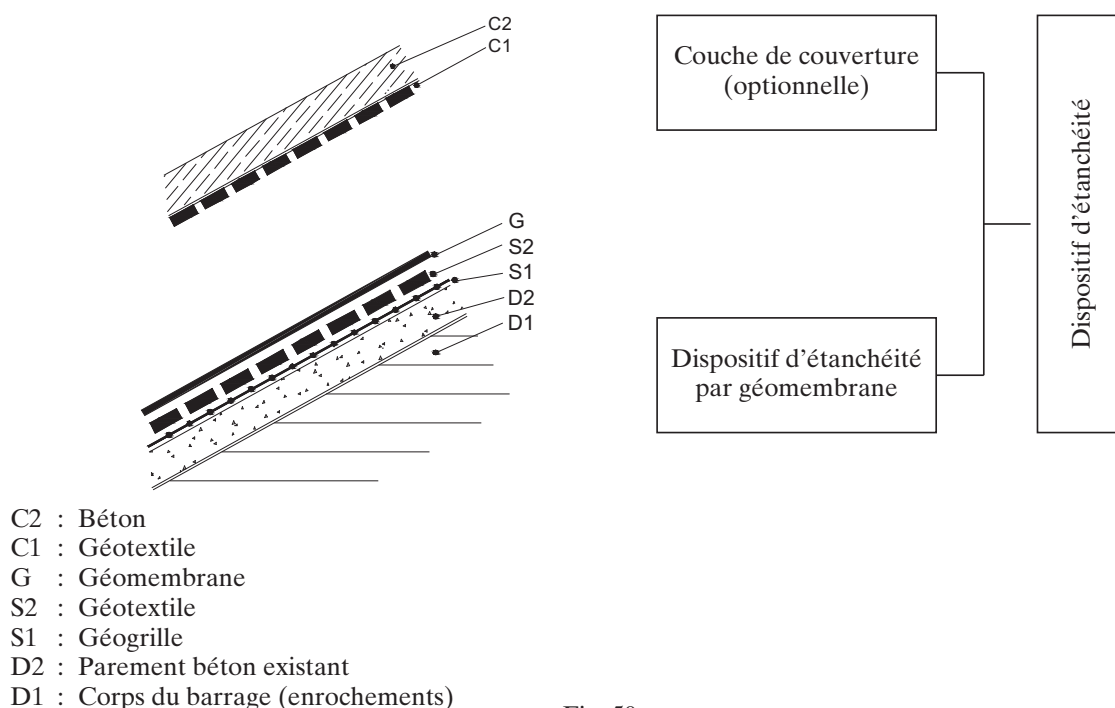


Fig. 50

Réhabilitation d'un barrage en enrochement

Dans l'exemple de la Fig. 50 il existe moins de couches car le besoin d'une protection anti-poinçonnement est moindre. Comme pour l'exemple 1, une couche de drainage doit être placée sous la géomembrane. Comme il s'agit d'une réhabilitation, on peut considérer que le parement ancien existant présente des fuites, et qu'il est assez perméable. Dans le cas contraire, une couche de drainage supplémentaire devra être mise en place.

4.3.2. Couche d'étanchéité par géomembrane

La couche d'étanchéité par géomembrane est formée de lés de largeur variable suivant la fabrication, soudés ensemble pour former une géomembrane d'étanchéité continue plane sur toute la surface. Selon la base de données, les géomembranes les plus courantes sur les barrages en remblai sont en polymères thermoplastiques de type PVC (environ 49 %) et PELBD (environ 16 %) mais peuvent également être composées d'élastomères. Les géomembranes bitumineuses ont été utilisées principalement en France. Les géomembranes PVC sont les plus courantes dans les installations exposées (environ 56 %, voir Tableau 27).

Les géomembranes de fort coefficient de dilatation thermique ne sont pas recommandées pour des utilisations exposées.

Une grande élasticité, mesurée dans les trois dimensions, et une limite d'élasticité très élevée sont des caractéristiques très importantes pour une géomembrane. Effectivement, la capacité de la géomembrane à s'adapter au support sous-jacent et à s'ajuster aux déplacements en cas de séisme dépend de ces caractéristiques.

Tableau 27
Types de géomembranes dans les barrages en remblai *

Type de géomembrane	Barrages	% du total	Total exposées	Total couvertes **	Inconnu
PVC	83	48,5	23	57	3
PELBD	27	15,8	0	26	1
Bitumineuses préfabriquées	20	11,7	7	13	0
PEHD	15	8,8	3	11	1
Elastomère	11	6,4	5	4	2
CSM	7	4,1	3	4	0
PP	6	3,5	3	3	0
CM	2	1,2	0	2	0
Total connu	171	100,0	44	120	7

* Les revêtements imprégnés *in situ* adoptés dans les installations anciennes comprennent 9 barrages présentant des solutions polymères et 3 barrages présentant des solutions bitumineuses.

** Y compris géomembranes centrales.

Pour fournir certaines indications de valeurs, nous présentons ci-après les caractéristiques des géomembranes PVC et bitumineuses installées sur 3 barrages en remblai, dont 2 sont de hauteurs comparables (environ 40 m) et un de hauteur supérieure (environ 90 m).

4.3.3. Couche support

Le but de la couche support est de former une base stable et régulière pour le dispositif d'étanchéité. La couche support doit fournir une portance et stabilité suffisantes. La granulométrie de la couche support doit permettre de contrôler un écoulement d'eau à travers une géomembrane défaillante. Toutefois, elle doit être assez perméable pour éviter une sous-pression provoquée par une fuite de la géomembrane, ou par une pression de vapeur et d'air entre la géomembrane et la couche de support.

La couche support doit être stable sur le remblai, et le frottement de l'interface entre sa surface supérieure et la géomembrane doit assurer une stabilité suffisante de cette dernière, avec ou sans couche de couverture.

La couche support doit également fournir une surface adéquate à la mise en place de la géomembrane. A cet effet, la surface de la couche support doit être testée spécifiquement pour vérifier qu'elle n'endommagera pas la géomembrane, même sous charge hydrostatique en exploitation. Nous recommandons un facteur de sécurité de 1,5.

La sélection de la couche support dépend de la géomembrane et des dimensions et caractéristiques de la couche inférieure, ainsi que de la pente du barrage. Dans les nouveaux barrages, la couche support peut être composée de sable et de graves stabilisés par du ciment ou du bitume si nécessaire. Nous

Tableau 28

Caractéristiques de certaines géomembranes installées sur des barrages en remblai

Barrage	Hauteur [m]	Couche support	Couche de couverture	GM	Caractéristiques	Valeurs*	Méthode d'essai
Bovilla (nouvelle construction)	91	Graves stabilisés ciment	Dalles béton coulées sur site	PVC-P	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Poids spécifique - Résistance en traction - Élongation à la rupture - Résistance à la déchirure - Résistance au poinçonnement 	<ul style="list-style-type: none"> 3 mm 1.30 g/cm³ ≥ 27 KN/m ≥ 230 % ≥ 380 N ≥ 1 550 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ASTM D 1593-UNI 8202/ 6 ASTM D 792 - UNI 7092 UNI 8202/8 - DIN 16726 ASTM D882 DIN 53363 DIN 16726
Winscar (réhab.)	52	Béton bitumineux	Aucune	PVC-P	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseurs - Poids spécifique - Résistance en traction - Allongement à la rupture - Résistance à la déchirure - Résistance au poinçonnement 	<ul style="list-style-type: none"> 2.5 mm 1.30 g/cm³ ≥ 25 KN/m ≥ 230 % ≥ 350 N ≥ 1 500 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ASTM D 1593-UNI 8202/ 6 ASTM D 792 - UNI 7092 UNI 8202/8 -DIN 16726 par.5.6.1. Table 1 - A - VII DIN 53363 DIN 16726
La Galaube (nouvelle construction)	43	Béton bitumineux à froid	Dalles béton coulées sur site	Bitumineuse	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - MPUA - Résistance en traction - Allongement à la rupture - Résistance au poinçonnement 	<ul style="list-style-type: none"> 4.8 mm 5.5 kg/m² ≥ 25 kN/m ≥ 60% ≥ 500 N 	<ul style="list-style-type: none"> NF P 84.512/1 NF P 84.514 NF P 84.501 NF P 84.501 NF P 84.507

*Les tolérances ne sont pas mentionnées.

conseillons un matériau de granulation arrondie dans la plage 5 à 25 mm. Pour minimiser le risque de dommages à la géomembrane par poinçonnement, il est possible d'adopter un géotextile optionnel collé à la géomembrane.

Comme la mise en place de sable ou de graviers sur une pente de 1V : 2H ou supérieure, habituelle pour les barrages en remblai, créera une surface instable, une couche d'épaisseur 15 à 40 cm de graviers stabilisés par un ciment pauvre, avec une perméabilité importante, peut être utilisée pour fournir un support uniforme semi-perméable pour la géomembrane. L'utilisation de matériaux arrondis pour la couche de support, destinés à réduire le risque de poinçonnement pour la géomembrane, doit être envisagée avec précaution, car ce type de matériau présente un angle de frottement inférieur, qui peut être préjudiciable à la stabilité du DEG. Des couches support stabilisées par du bitume peuvent également être envisagées.

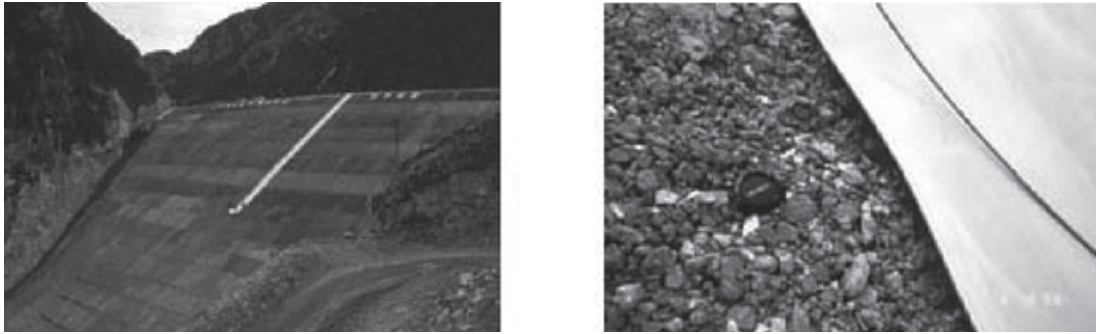


Fig. 51 et 52

Couche support pour un géocomposite PVC à Bovilla (Albanie 1996, hauteur 91 m),
graviers stabilisés par ciment

Pour la réhabilitation de barrages en remblai présentant une couche d'étanchéité amont composée de béton bitumineux ou de dalles béton, la surface offre en général un support suffisamment résistant et régulier pour n'utiliser qu'un géosynthétique de type géotextile, géofilet ou géo-espaceur comme couche support, qui peut éventuellement faire corps avec la géomembrane. De plus, la couche de drainage du nouveau DEG peut égaliser les irrégularités et rugosités de la surface.

4.3.4. Couche drainante

Aucun ouvrage artificiel n'étant absolument imperméable, il faut envisager que la géomembrane la mieux installée puisse néanmoins présenter des fuites. Un drainage adapté doit faire partie des études pour tout dispositif d'étanchéité par géomembranes. Lorsque la couche support est semi-perméable, une couche drainante est nécessaire sous la couche de support, si le corps du barrage n'a pas de caractéristiques de drainage libre.

Pour répondre aux spécifications d'un drainage, la couche doit :

- Collecter et drainer toute fuite du dispositif de géomembrane, et éviter l'augmentation de la pression hydrostatique derrière le DEG en cas de baisse rapide du niveau du réservoir ;
- Évacuer derrière la géomembrane la pression de vapeur provoquée par l'humidité pénétrant par la face aval du barrage, et le réchauffement solaire répété ;
- Équilibrer la pression derrière la géomembrane en cas d'évolution rapide de la pression atmosphérique.

La capacité de drainage est fonction de la transmissivité, qui dépend de l'épaisseur et de la perméabilité de la couche. Lors du calcul de la transmissivité nécessaire, il est pertinent de prévoir une couche de drainage capable d'absorber la fuite la plus importante envisageable et d'éviter le soulèvement de la géomembrane.

Pour être efficace, la couche de drainage doit avoir un raccordement continu de capacité drainante adaptée vers une évacuation libre.

La couche de drainage est en général nécessaire pour un barrage en remblai lorsque ce dernier est moins perméable que la couche support. Pour les barrages en enrochement, avec une perméabilité supérieure à celle de la couche support, elle n'est pas nécessaire.

La couche de drainage doit avoir une haute perméabilité.

En cas de réhabilitation (dalles béton ou étanchéité béton bitumineux), la couche de drainage sera formée par des géofilets ou géo-espaceurs. Les géofilets, qui doivent être assez résistants pour éviter qu'ils ne s'écrasent sous la pression de l'eau, consistent en des nervures polymères entrecroisées et soudées les unes aux autres de manière à former un filet de forme stable, présentant de larges ouvertures et une grande transmissivité. Les géofilets sont préférables aux géotextiles et leur transmissivité supérieure même sous charge d'exploitation est un avantage. La composition des couches de drainage synthétiques doit leur permettre de garder des propriétés physico-mécaniques, notamment transmissivité, pratiquement constantes pendant la durée de vie du dispositif d'étanchéité.

Pour les barrages en remblai de faible perméabilité, la couche de drainage doit être raccordée à son pied à un dispositif d'évacuation assurant un drainage libre vers la face aval du barrage. Dans les nouveaux barrages, le dispositif de drainage est en général une couche drainante de base (tapis drainant). Lors de la réhabilitation de barrages en remblai sans tapis drainant, l'eau de la couche drainante peut être collectée par un tuyau perforé, noyé dans une tranchée périphérique raccordée à une évacuation vers l'aval.

Le point de rejet de l'eau drainée doit être conçu pour permettre de mesurer les volumes d'eau au titre de la surveillance.

4.3.5. Zone de transition

Une zone de transition n'est nécessaire que pour assurer une fonction de filtre entre la couche drainante et la couche support, et entre la couche drainante et le matériau du corps du barrage. Cet élément, commun à tout dispositif d'étanchéité sur un barrage en remblai, fait partie de la conception du barrage. Les spécifications pour cette zone ne rentrent pas dans le cadre de ce bulletin.

4.3.6. Ancrage sur le parement

4.3.6.1. Généralités

Avec la plupart des géocomposites, lorsque la pente est peu inclinée, le coefficient de frottement de la couche géotextile peut être suffisante pour fournir une certaine stabilité sur la face amont du barrage. Le frottement permet alors d'assurer l'ancrage. En théorie, il n'est pas forcément nécessaire de prévoir un ancrage supplémentaire. Cependant, à moins que la géomembrane exposée ne soit en permanence sous charge hydrostatique, il n'est pas recommandé de ne compter que sur le frottement, car la géomembrane doit rester en place pendant la période d'installation alors que le réservoir est vide. Un ancrage et/ou un lest sont nécessaires pour que la géomembrane résiste à l'aspiration du vent ou au soulèvement par les vagues, et pour éviter la formation de zones lâches, de plis ou de rides qui sont des chemins privilégiés de fuite, en cas de dommage à la géomembrane, et des points de concentration de contraintes et de vieillissement. Le cas d'un réservoir vide devra être pris en compte lors du dimensionnement des ancrages.

L'ancrage de la géomembrane uniquement en crête est acceptable uniquement pour de courtes pentes, car dans les autres cas des surtensions et ruptures mécaniques peuvent survenir. La pente limite peut être vérifiée par des calculs du

type de ceux présentés au § 4.2. L'ancrage de la surface totale de la géomembrane est une pratique courante.

L'ancrage en surface peut être effectué soit par des dispositifs mécaniques, soit par collage (géomembranes exposées), soit par lestage (géomembranes couvertes). Un lestage permanent partiel peut être envisagé sur les géomembranes exposées sur les petits barrages.

4.3.6.2. Ancrage mécanique

L'ancrage mécanique, qui concerne uniquement les géomembranes exposées, demande un support assez résistant pour que la fixation des ancrages puisse résister aux forces qui lui seront transférées.

Les ancrages mécaniques sont mis en oeuvre pour fixer le DEG sur le parement, dans le cas de dispositifs exposés sur un support rigide (notamment béton pour les barrages en enrochement à parement béton, béton bitumineux et revêtement acier), et pour fixer temporairement la géomembrane en cours de construction. Il faut bien prendre en compte le soulèvement par le vent ou les vagues qui peuvent réduire le frottement, toutes les forces étant alors reprises par les ancrages.

Les ancrages mécaniques sur le parement peuvent être disposés :

- à certains points sur la surface inclinée. Ce type d'ancrage est approprié pour une maille suffisamment petite de points d'ancrage, et si les contraintes ne sont pas trop élevées; sinon, il ne sera pas suffisant pour maintenir correctement le revêtement en place, car les contraintes sur les géomembranes au niveau des ancrages seront inacceptables. L'espacement des ancrages dépend du frottement entre la surface de support et le dispositif d'étanchéité par géomembrane, et la résistance de cette dernière. Avec des résistances et des frottements élevés, cet espacement peut être plus important;
- linéairement. Des ancrages linéaires (parallèles à la pente) sont installés sur la surface du barrage. L'espacement entre les lignes d'ancrage, et le type de système d'ancrage, doivent être conçus de manière à ce que la géomembrane soit maintenue en place correctement entre les lignes, en minimisant les contraintes en traction dues au soulèvement par le vent ou par un abaissement du réservoir. Si l'ancrage doit être effectué sur la surface de support existante, sa conception va dépendre de la résistance et de la stabilité de cette surface. Si la surface de support est préparée simultanément, les lignes d'ancrage peuvent être intégrées dans le nouveau parement.

Les ancrages mécaniques ponctuels peuvent être effectués avec de simples ancrages métalliques qui serrent la géomembrane sur la surface de support. Ces ancrages sont fixés dans la surface réceptrice. L'utilisation d'ancrages mécaniques ponctuels n'est pas recommandée, car les forces s'appliquant sur la géomembrane sont transférées au support uniquement au niveau de la circonférence du forage dans lequel se trouve l'ancrage. La concentration de contraintes sur la géomembrane est extrêmement élevée. Si un point d'ancrage cède, la contrainte est transférée sur les points adjacents qui peuvent ne pas être assez résistants pour absorber l'augmentation de contrainte, et céder à leur tour, provoquant une rupture progressive du système d'ancrage. Les ancrages ponctuels sont acceptables si équipés d'un système pour transférer les contraintes sur une surface majeure. L'ancrage linéaire est préférable à l'ancrage par points, car la distribution de contraintes est beaucoup plus appropriée.

L'ancrage mécanique linéaire est normalement adopté pour les dispositifs d'étanchéité par géomembranes. Dans les nouvelles constructions, une option simple et efficace consiste à noyer dans le support, des « bandes » rapprochées du même matériau que la géomembrane du DEG. Ces bandes sont disposées de manière à former des lignes parallèles continues, sur lesquelles la géomembrane étanche sera soudée à chaud. Les soudures sont étudiées pour qu'elles puissent résister aux efforts (vent, vagues) prévus par calcul. Dans cette configuration, le système étanche (la géomembrane) et les lignes d'ancrage (les bandes) sont constitués du même matériau synthétique flexible et donc parfaitement capables de s'adapter aux déformations du corps du barrage. D'autres options pour l'ancrage mécanique linéaire consistent à prévoir la construction de tranchées verticales dans lesquelles des bandes de géomembranes sont insérées, ou la construction de poutrelles de béton, intégrées dans le parement amont sur lesquelles la géomembrane est fixée par des plats de fixation en acier inoxydable. Certaines des options citées sont brevetées.

Pour la réhabilitation de barrages présentant une étanchéité de surface assurée par un parement béton (barrages en enrochements), les lignes d'ancrage peuvent être fixées sur les dalles. C'est le même concept d'installation que sur les barrages en béton.

Pour la réhabilitation des barrages présentant une étanchéité de surface à base de béton bitumineux, l'ancrage mécanique du dispositif d'étanchéité par géomembranes sur le support est difficile en raison du fluage. Pour permettre un ancrage dans le béton bitumineux, un dispositif efficace consiste à utiliser des ancrages profonds constitués de barres d'acier noyées dans le mortier, ou des matériaux injectés qui pénètrent soit dans la couche bitumineuse, soit dans le remblai qui se trouve en dessous. L'ancrage par insertion s'est également révélé une solution efficace : une rainure est creusée dans la couche bitumineuse, la géomembrane y est insérée avant remplissage par une résine viscoélastique adaptée.

Dans de nombreux cas, aussi bien pour les barrages en enrochements à masque béton que pour les parements en béton bitumineux, les lignes d'ancrage ont été constituées par des systèmes de tensionnement adaptés à la réparation de barrages en béton (Bulletin 78).



Fig. 53

Winscar, Royaume-Uni 2001. Réhabilitation d'un parement en béton bitumineux portant un géocomposite exposé d'une épaisseur de 2,5 mm en PVC. Les profilés de tensionnement qui ancrent les lés de PVC au parement du barrage sont fixés au béton bitumineux par des barres de longueur de 200 mm et de diamètre 12 mm en acier inoxydable noyées dans une résine. Le système de tensionnement, breveté, est le même que celui utilisé pour la réhabilitation des barrages en béton

Des essais d'arrachement sur site peuvent confirmer le type et l'espacement des ancrages. Les ancrages peuvent soit être des ancrages mécaniques (boulons en acier inoxydable ou chevilles à expansion et boulons) ou ancrages chimiques (barres d'ancrage fixées par résine époxy). Les avis divergent sur la performance à long terme des ancrages mécaniques comparés avec les ancrages chimiques. Les ancrages mécaniques sont préférés en France par exemple, tandis que les ancrages chimiques sont plus fréquemment utilisés en Allemagne, Italie et aux États-Unis.

Les plats de fixation et les ancrages doivent être conçus pour résister à l'arrachement et aux contraintes normales et tangentielles. Si le dispositif d'ancrage impose également une précontrainte, celle-ci doit être prise en compte comme charge additionnelle agissant sur les goujons d'ancrage.

4.3.6.3. Ancrage par lestage

Sur les petits barrages, des poids disposés sur la géomembrane peuvent être utilisés comme ancrage permanent s'ajoutant à la fixation en crête et en pied.

Ces poids peuvent être placés sur le parement amont sous la forme de traverses ou de poutrelles en béton préfabriquées, ou tout autre type de lest. Ils peuvent être placés parallèlement à la pente, ou horizontalement sur une risberme. Pour minimiser le transfert de charge au DEG, les poids verticaux ne doivent pas s'appliquer à la géomembrane, mais doivent être ancrés sur une structure distincte du DEG.

Ces poids peuvent être noyés dans le parement amont sous la forme de poutrelles béton placées dans une tranchée verticale ou horizontale. Dans cette configuration, la géomembrane d'étanchéité peut être soudée à une bande de géomembrane lestée dans la tranchée, ou placée dans la tranchée et recouverte par les poids. Dans ce cas, une bande de géomembrane est placée de manière à recouvrir la poutrelle, et est soudée de manière étanche à la géomembrane principale. Les caractéristiques de la soudure sont calculées pour résister aux efforts (vent, vagues etc.). Ce type de dispositif d'ancrage est fréquemment utilisé en Espagne pour les petits barrages.

Pendant l'installation, la géomembrane est normalement chargée sur toute la surface par des sacs de sable pour la maintenir en position jusqu'à la mise en place de l'ancrage ou de la couche de couverture définitive. Voir le paragraphe concernant l'installation.

4.3.6.4. Collage

Le dispositif d'étanchéité par géomembranes peut être ancré par collage du géotextile (élément inférieur d'un géocomposite) avec un matériau synthétique compatible sur le parement du barrage. Ce ne sera possible que pour la réhabilitation de barrages en remblai à parement béton. Le collage ne doit pas être continu sur tout le parement pour permettre le drainage derrière la géomembrane et l'évacuation de la pression de vapeur qui provoquerait un soulèvement, éventuellement un décollement voire des dommages à la géomembrane ou à la couche support. De plus, la durée de vie de la liaison entre la géomembrane et le béton et entre la colle et la géomembrane est incertaine. La mise en place de la colle

dépend des conditions météorologiques (humidité de l'air et du support, température etc.) et sa qualité est difficile à contrôler objectivement. En général le collage n'est pas une pratique courante, et on ne note que quelques applications (Pappadai, Italie, Bois de Cure et Les Marquisades, France).

La réhabilitation des parements béton ou béton bitumineux avec une géomembrane collée sur toute la surface n'est pas recommandée. Il a effectivement été constaté que des bulles d'eau (condensation ?) se forment en pareil cas sous la géomembrane. Ces bulles sont des points faibles potentiels sensibles à l'action des vagues, au remplissage et à la vidange du réservoir, et la géomembrane peut finalement se rompre.

4.3.6.5. *Ancrage par lest (géomembrane couverte)*

Une autre méthode possible sur les barrages en remblai consiste à fixer la géomembrane sur le support par un lest. Ce lest est constitué par la couche de couverture qui fournit également une protection contre le vandalisme, les UV ou les intempéries en général.

Le choix de couvrir ou non la géomembrane est une décision importante à prendre en cours d'étude. Il existe plusieurs exemples de géomembranes exposées dont les performances sont excellentes depuis plus de 25 ans (voir base de données) même en environnement agressif (rayonnement UV, températures élevées, altitude, glace, régions ventées, etc.).

La couche de couverture installée sur le coté amont de la géomembrane, non seulement la protège contre les contraintes extérieures, mais la plupart du temps l'ancre sur le support par son seul poids. Les forces de cisaillement transférées à la géomembrane par le poids de la couche de couverture doivent être calculés, et leur impact à long terme évalué sur la base des caractéristiques de la géomembrane.

Nous recommandons vivement que la géomembrane et la couche de couverture puissent se déformer de manière indépendante, et qu'une couche de désolidarisation, par exemple un géotextile, soit placé entre les deux. De plus, le concepteur ne doit pas oublier les dommages potentiels pouvant être provoqués par la mise en place de la couche de couverture : rayures ou poinçonnements pendant l'installation et l'exploitation. Un matériel d'amortissement (synthétique ou naturel) est toujours recommandé pour la protection entre la géomembrane et la couche de couverture. Une couche géosynthétique adaptée peut assurer les deux fonctions (amortissement et désolidarisation). Une attention particulière doit être accordée aux dommages potentiels provoqués le long des joints d'une couche de couverture en béton s'il celle-ci se déplace ou effectue une rotation.

Le concepteur a le choix entre différentes options pour la couche de couverture. Dans tous les cas, une couche drainante entre la couche de couverture et la géomembrane est nécessaire pour éviter les sous-pressions. La couche de couverture peut être de différents types :

Couches lourdes :

- *Couche de couverture en remblai* : une couche de remblai se comporte positivement sur un barrage en remblai déformable. La couche de remblai placée en amont doit résister à l'action des vagues du réservoir. C'est

pourquoi elle est théoriquement constituée d'enrochements ou de rip-rap. Pour éviter tout dommage à la géomembrane par l'enrochement ou le rip-rap, une zone de transition s'impose entre la géomembrane et la couche de couverture. Cette zone peut être constituée d'un géotextile résistant, et d'une couche de transition en sable et gravier. La stabilité de la couche de couverture doit être vérifiée. La perméabilité doit être élevée pour éviter les sous-pressions entre la géomembrane et la couche de couverture, car cela pourrait détruire cette couverture.

- *Dalles bétons* : il a été démontré que les dalles béton utilisées comme couche de couverture présentent de nombreuses déficiences au niveau de leur durée de vie et des problèmes de rigidité comparée à la flexibilité de leur support. Pour résister à l'action des vagues, des dalles renforcées, la plupart du temps coulées sur place, parfois préfabriquées, sont mises en place. La dimension des dalles peut atteindre 5×5 m et leur épaisseur environ 300 mm. Rouchain (France 1999) en est un exemple. Sur le barrage de Bovilla (Albanie, 1996) les dalles coulées sur site en béton non armé avaient des dimensions de 3×6 m, et une épaisseur comprise entre 300 et 200 mm. Il existe également un danger de déplacement des dalles par la sous-pression, si aucune disposition n'est prise pour évacuer l'eau piégée entre les dalles et la géomembrane se trouvant en dessous. Des précautions doivent être envisagées pendant la mise en place du béton pour éviter d'endommager la géomembrane. Les dalles béton préfabriquées ne doivent être utilisées que si le support a une finition lisse et uniforme, permettant d'éviter les contraintes excessives sur la géomembrane aux points de contact des panneaux préfabriqués avec les points saillants du support.
- *Gabions* : (les matelas d'enrochements sont des paniers rectangulaires formés de mailles de fils d'acier tressés torsadés galvanisés). Cette couverture doit être installée avec soin pour éviter les dommages à la géomembrane par les pièces métalliques.

Couvertures légères :

- *Dalles minces* : coulées sur place ou préfabriquées, peuvent être utilisées lorsqu'une couverture légère est suffisante. La dimension des dalles reste modeste, en général entre 5 m^2 et 20 m^2 . L'épaisseur des dalles varie entre 60 et 150 mm.
- *Blocs béton préfabriqués* : identiques à ceux utilisés dans les ouvrages hydrauliques ou pour le pavement de routes, ont également été utilisés en couche protectrice. Ils peuvent cependant subir des déplacements excessifs et finir par être délogés (Ospedale, France 1978).
- *Béton projeté* : une couverture continue peut être constituée d'une couche de béton projeté. L'épaisseur varie généralement entre 40 et 80 mm. Si nécessaire, le renforcement du béton projeté peut être obtenu à l'aide d'un géotextile, ou d'une géogrille, ou encore d'un grillage de renforcement en acier. Une couverture légère peut n'être ancrée qu'en crête, sans besoin d'une risberme intermédiaire de support. La longueur de la couche inclinée dépend de la charge maximale pouvant être supportée par le renforcement. Ce type de protection est d'apparence plus fragile que celle d'une dalle béton



Fig. 54

Dalles béton non renforcées installées sur un géocomposite PVC de 3,0 mm, seule barrière d'étanchéité sur le barrage de Bovilla (Albanie).

Les dalles sont coulées sur place, sur un géotextile de 700 g/m² protégeant le géocomposite

conventionnelle, et le béton projeté peut se fissurer, sans toutefois remettre réellement en question sa fonction de protection. Une couverture en béton projeté présente un drainage libre à l'arrière, mais un dispositif additionnel de barbacanes permet de mieux évacuer les sous-pressions. Ce type de protection légère a été mis en oeuvre avec succès (réservoir de Mucone, Italie, 1986).

- *Couche de mélange bitumineux* : il est possible d'utiliser une couche d'agrégats de granulométrie ouverte enduits de bitume, d'épaisseur suffisante pour résister à l'action des vagues et aux contraintes externes. Une condition préalable est la compatibilité du dispositif d'étanchéité avec le bitume. Si ce n'est pas le cas, une couche de désolidarisation peut être utilisée, par exemple un géotextile posé sur la géomembrane. La température du mélange doit être compatible avec les valeurs limites supportées par la géomembrane.

La couche de couverture ne doit pas glisser sur le dispositif d'étanchéité. La stabilité en glissement de la couche peut être atteinte par une stabilité propre et par le maintien en pied de pente (couvertures lourdes de type dalles béton). La stabilité au glissement peut être obtenue par le frottement entre la couche de couverture et la géomembrane, avec ou sans protection intermédiaire (couverture en remblai). Elle peut également être obtenue par un ancrage en crête (couverture légère de type béton projeté renforcé de matériaux synthétiques).

Des couvertures partielles peuvent être mises en place dans les zones où une couverture est nécessaire. L'extension de ces couvertures dépend du mode d'exploitation du réservoir. Elles peuvent être réalisées à partir de dalles béton légères non renforcées, ou par une combinaison de béton projeté et de matériau synthétique ancré en crête.

S'il s'agit de dalles béton, la composante tangentielle du poids des dalles béton peut être supportée de l'une des manières suivantes :

- Par un renforcement acier ancré en crête.
- Par une poutrelle béton, parallèle à l'axe longitudinal du barrage et construite sur le parement amont du barrage, à une hauteur déterminée par la zone que l'on désire protéger.

- Par une poutrelle acier en H, placée horizontalement à une hauteur déterminée par la zone que l'on désire protéger. La poutrelle est ancrée au parapet ou à une poutrelle béton en crête par des câbles d'acier.

Les spécifications d'une couverture de géomembrane doivent prendre en compte les problèmes associés au tensionnement ou à l'élongation de la géomembrane, aux difficultés d'inspection visuelle ou de réparation sans avoir à supprimer la couche protectrice.

4.3.7. Ancrage en périphérie

Le dispositif d'étanchéité par géomembranes doit être ancré en périphérie pour fournir une connexion étanche avec les appuis du barrage ou les ouvrages annexes en béton, et pour maintenir la géomembrane en place.

Première exigence concernant l'ancrage périphérique du DEG : il doit permettre les déformations différentielles entre le remblai et les ouvrages béton, sans induire de tensions excessives dans la géomembrane.

C'est pourquoi les géomembranes raccordées à des ouvrages métalliques ou béton doivent être étudiées avec soin. Un cas d'école serait représenté par le raccordement d'une géomembrane posée sur le parement amont d'un barrage en remblai à une plinthe périmétrale en béton, ou à un évacuateur de crues.

La conception doit prendre en compte les tassements, déformations et autres phénomènes causant contraintes et déformations. Dans le cas de dispositifs d'étanchéité couverts, il est possible d'utiliser des nappes de faible frottement comme couches de désolidarisation, et des poches de sable pour protéger la géomembrane contre d'éventuels dommages dus au déplacement ou à la rotation de la couche de couverture au niveau du raccordement. Une surlongueur de géomembrane au raccordement améliore la capacité d'adaptation aux mouvements différentiels importants sans aucun dommage.

Un modèle 3D est fondamental pour une conception adaptée dans ces zones cruciales.

L'ancrage périphérique peut être de type arrimage (mécanique), ou de type insertion.



Fig. 55

Rouchain (France, 1999).

Le raccordement mécanique de la géomembrane à la prise d'eau a été étudié pour s'adapter aux mouvements différentiels entre le corps du barrage et l'ouvrage de prise d'eau

4.3.7.1. Ancrage mécanique

Un ancrage mécanique s'applique pour la fixation du DEG en périphérie sur des ouvrages béton (évacuateur, exutoires). En général, la géomembrane est comprimée avec des matériaux de module d'élasticité inférieur (joints néoprène ou caoutchouc) entre le support et un plat de fixation en acier inoxydable qui est lui-même ancré à l'ouvrage en béton.

L'étanchéité n'est assurée que si la géomembrane est parfaitement adaptée au support, et si tous les points où l'eau peut s'infiltrer sont colmatés. En raison de la rugosité du support, des joints et/ou des couches de support en résine sont également nécessaires pour fournir une liaison parfaite entre le support et la géomembrane. Il est extrêmement important d'appliquer une compression adaptée à la géomembrane, et d'éviter tout interstice entre la géomembrane et le support de fixation. Les dimensions des plats de fixation en acier dépendent de la distance entre les ancrages, et de leur taille. L'assemblage doit être assez rigide pour colmater tous les interstices entre la géomembrane et le support. Le gradient étant au maximum aux limites, si il y a une infiltration, la pression hydraulique tend à soulever l'assemblage. Lorsqu'elles doivent résister à des pressions hydrostatiques supérieures à 50 m, les plats de fixation sont au minimum de 60 x 6 mm, et l'espacement des chevilles en général de 150 mm. Aux périphéries, sans autre pression hydrostatique que la pluie et la fonte de la neige, les plats de fixation sont compris entre 30 et 50 mm, pour une épaisseur de 2 à 3 mm. L'espacement des ancrages peut être plus important. La rigidité globale du profilé d'assemblage, de la géomembrane et du joint doit toujours être prise en compte.

Les composants des dispositifs d'ancrage mécanique (tous les matériels d'ancrage de type chevilles, boulons, profils de serrage, vis) doivent être en acier inoxydable pour garantir une longue durée de vie sans corrosion.

Ils doivent résister aux produits chimiques issus du béton du barrage et d'autres ciments, ainsi qu'à ceux se trouvant dans l'eau du réservoir. Pour une meilleure protection contre la corrosion, le dispositif de serrage peut être couvert par une géomembrane, elle-même soudée au dispositif d'étanchéité, et qui bien sûr ne doit pas être percée par les ancrages. En général, il est plus sûr de compter sur la qualité des composants en acier, en évitant le recouvrement par la géomembrane.



Fig. 56 et 57

À gauche : joint périphérique en pied sur la plinthe béton à Bovilla, Albanie.

À droite : test des composants du joint périphérique.

La section du plat de fixation, l'espacement des ancrages, le type de joint et la compression appliquée jouent un rôle dans la construction d'une étanchéité efficace

Les supports élastiques de type caoutchouc, caoutchouc mousse, néoprène etc. et les waterstops doivent être résistants au contact du système d'ancrage, des géomembranes et du matériau du barrage, ainsi qu'aux UV. Les mêmes considérations de type (mécanique ou chimique) et d'espacement des ancrages mécaniques sur le parement s'appliquent à l'ancrage périphérique.

4.3.7.2. Ancrage de type insert

Un ancrage fondé principalement sur le frottement est l'ancrage périphérique de type insert. Adopté en général pour un ancrage en pied, il consiste en une rainure creusée dans le support (béton ou béton bitumineux), qui accueille la géomembrane d'étanchéité, noyée dans une colle et un mastic adapté qui jouent le rôle de joint étanche déformable remplissant la rainure. Ce type de joint périphérique peut facilement traverser des joints structuraux ou des surfaces fissurées, et il est également efficace sur des supports ne présentant pas une très grande résistance, et donc non adaptés aux dispositifs d'ancrage traversant la géomembrane (chimique et mécanique). Leur utilisation est difficile, car ils sont très dépendants de l'état du support et des conditions météorologiques au moment de la mise en place.

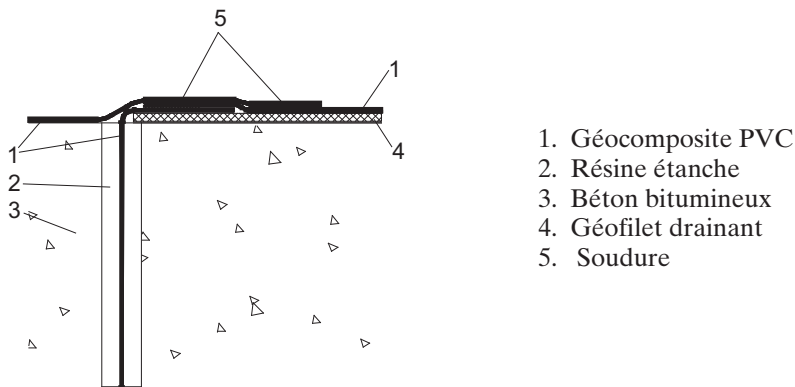


Fig. 58

Ancrage de type insert (Moravka, République tchèque, Lechstaustufe, Allemagne, Pappadai, Italie, Cixerri, Italie)

4.3.7.3. Ancrage par lest

La méthode de calcul ébauchée concerne d'abord l'ancrage supérieur du géotextile, au cas où le DEG présente une surface de glissement à l'interface géomembrane/géotextile, car la géomembrane a un angle de frottement faible avec d'autres matériaux. Lorsque le DEG n'est pas autostable par le simple frottement, le géotextile supérieur doit être ancré en tête pour éviter tout glissement et pour absorber les contraintes provoquées par la couverture de terre reposant sur le DEG, et donc celles qui s'exercent sur la géomembrane. Le calcul peut également s'appliquer à l'ancrage de la géomembrane (notamment géomembrane exposée), mais dans ce cas, la capacité d'ancrage de la tranchée peut être limitée pour éviter des contraintes excessives sur la géomembrane.

Suivant les contraintes spatiales sur la structure, l'ancrage peut s'effectuer de différentes manières, allant du simple recouvrement (la géomembrane est étendue horizontalement puis couverte par le lest) jusqu'aux tranchées de différentes formes géométriques.

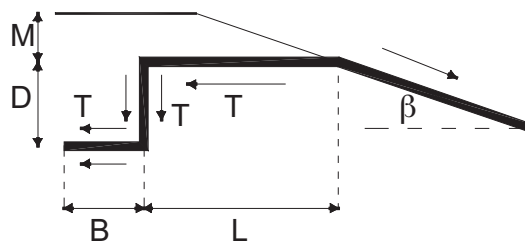


Fig. 59

Forme générale d'une tranchée d'ancrage

- β = Angle de la pente
- T = Force de frottement résultant de la tension dans la géomembrane
- L = Longueur de l'étendue
- B = Largeur de la tranchée
- D = Profondeur de la tranchée
- M = Épaisseur de la couverture

Il existe de nombreuses méthodes pour ancrer le DEG en tête de pente. Trois d'entre elles, très fréquentes, se sont révélées efficaces (Fig. 59) :

- Simple couverture sur la longueur L,
- Ancrage partiel ou noyage vertical (L+D),
- Ancrage complet (L+D+B).

Si la fondation au pied amont du barrage et sur la périphérie des appuis consiste en sol ou roc étanche, la géomembrane peut être ancrée par noyage dans une tranchée, remplie par la suite par un matériau argileux pour obtenir une étanchéité dans la transition du DEG à la fondation du barrage. Les parois de la tranchée trapézoïdale doivent être revêtues par un matériau argileux sans pierres. On prendra soin d'éviter les angles aigus dans la tranchée, ainsi que les pierres coupantes qui pourraient endommager la géomembrane. Pour ce type d'ancrage, les infiltrations contournant la tranchée en provenance du réservoir doivent être contrôlées.

L'ancrage d'une géomembrane exposée dans des tranchées périphériques ne doit être mis en oeuvre que pour des pentes courtes ou des zones limitées. La dimension dépend du maintien de la géomembrane par simple frottement sur la pente, qui permet d'éviter les contraintes en traction dues à la gravité. Pour des zones plus étendues ou des pentes plus longues, il existe un risque de soulèvement par le vent ou par les vagues.

4.3.8. Ancrage autour des conduites et autres pénétrations

Dans le cas d'une conduite synthétique traversant la géomembrane, celle-ci doit être soudée sur une collerette comme présenté en Fig. 60.

S'il s'agit d'une conduite en acier, le raccordement étanche doit être assuré par un dispositif de serrage fixé sur une collerette de la conduite, comme indiqué Fig. 61.



Fig. 60 et 61

Raccordements étanches sur des conduites synthétiques et acier

4.4. DISPOSITIF INTERNE

Les indications données pour un dispositif amont concernant le raccordement de la géomembrane avec la fondation du barrage ou tout ouvrage béton, la mise en place d'un dispositif de drainage et l'étagement granulométrique des différentes couches dans le respect des critères de filtre, s'appliquent également à un dispositif interne. Ce bulletin n'a pas vocation à entrer dans les détails de la conception des barrages. En conséquence, les considérations qui suivent sont destinées à donner des informations générales sur la façon dont ces dispositifs d'étanchéité ont été mis en œuvre, plutôt qu'à établir des principes de conception. Dans certains cas, la géomembrane a été placée en amont du noyau central en argile, avec absence de couche drainante entre ce dernier et la géomembrane.

La géomembrane, de par sa position au sein du barrage, est stabilisée par les recharges du barrage, et ne demande donc pas de remblai ou d'ancrage pour son maintien en place.

Le dispositif d'étanchéité par géomembrane est formé par des lés simples ou multiples de largeur variable, suivant leur fabrication, qui sont soudés les uns aux autres pour former une géomembrane continue. Suivant la position dans le barrage, la géomembrane est mise en place sur un plan incliné (par exemple la pente amont d'un noyau imperméable, Zhushou en Chine), ou en zigzag si elle se trouve sur un axe pratiquement vertical (par exemple Fencheng et Wanfuzou en Chine). Si l'on se réfère à la base de données présentée dans ce bulletin, les géomembranes internes les plus utilisées sont en thermoplastiques polymères de type PVC (12 au total, hauteur maximale 60,2 m) et PELBD (4 au total, hauteur maximale 53 m), parmi 20 barrages. Une géomembrane bitumineuse a été mise en place à Valence d'Albi en France.

En raison de sa position protégée à l'intérieur du barrage, la géomembrane n'est pas sujette à des agressions externes, qu'elles soient physiques, biologiques ou chimiques. Même si, dans les cas présentés, l'épaisseur d'une géomembrane en position interne est souvent bien inférieure à celle d'une géomembrane en position amont, l'inverse serait bien préférable pour des raisons de sécurité, afin de résister à la mise en place des remblais et afin d'assurer la plus longue durée de vie possible, car la géomembrane n'est plus accessible quand le barrage est en exploitation.

La géomembrane est en général protégée par les matériaux adjacents contre le poinçonnement. Dans la plupart des applications mentionnées, les couches de

protection sont constituées de géotextiles, parfois avec des couches de sable supplémentaires. Quoique dans le cas d'un barrage en remblai composé de matériaux de granularité fine, des couches de protection supplémentaires ne soient pas indispensables, leur utilisation est recommandée pour éviter le transfert de contrainte du remblai à la géomembrane. En aucun cas on ne pourra s'appuyer sur le dispositif d'étanchéité pour assurer la stabilité du remblai.

4.5. MISE EN PLACE

La technique générale permettant d'installer un dispositif de géomembrane sur un barrage, reste à peu près la même, que ce soit pour étanchéifier un nouvel ouvrage ou pour rénover un barrage existant, et dépend globalement du type de support. Dans les deux cas le dispositif d'étanchéité par géomembrane est installé sur le parement amont du barrage une fois terminé.

L'installation du DEG peut être effectuée sur tout le parement du barrage en déroulant des lés depuis la crête. C'est la technique la plus souvent utilisée pour les réhabilitations.

L'installation peut être effectuée au fur et à mesure des phases de construction du corps du barrage, comme c'est fréquemment le cas pour les dispositifs internes et pour les barrages de stériles. Lorsque le remblai a atteint une certaine hauteur, la géomembrane est déroulée le long de la pente. Dans les nouvelles constructions équipées d'un dispositif amont, une installation progressive en cours de montée du remblai améliore la sécurité relative aux crues, et peut permettre une mise en eau précoce du réservoir. Lors de réhabilitations, la mise en œuvre par étapes successives sur le plan vertical permet une installation en différentes phases qui minimise l'impact sur l'exploitation.

La géomembrane a parfois été installée en bandes horizontales, la plupart du temps sur des pentes très faibles et avec des rouleaux de largeur limitée. Cette méthode permet de mettre en place le dispositif d'étanchéité en cours d'élévation du remblai, de minimiser les longueurs de soudures, d'éviter les soudures triples, de maîtriser le risque de soulèvement par le vent et les contraintes excessives sur les soudures horizontales, et le cas échéant autorise la mise en place immédiate de la couche de protection. Une mise en place horizontale a été effectuée par exemple au barrage de Jibiya (Nigeria).

4.5.1. Couche support

Dans les nouvelles constructions équipées d'un dispositif amont, la couche de base située sous la couche de support est en général mise en place et compactée en couches horizontales, en même temps que le remblai du barrage. On peut conseiller une mise en place et un compactage de la couche de base dépassant du profil de pente définitif pour un bon niveau de stabilité. Avant de mettre en place la couche support, la couche de base doit être recalibrée pour correspondre au profil de pente, et recompressée.

La couche support et de drainage doit être compactée par des petits rouleaux vibrants. La surface finale de la couche support doit être bien compactée, régulière et sans éléments saillants. Le compactage est crucial : sur un barrage en remblai de

29 m (Regulating Reservoir, États-Unis 1996) le revêtement CSM s'est révélé défaillant au niveau de la tour de prise d'eau lors de la première mise en eau, en raison du mauvais compactage et de la préparation inadaptée du support du revêtement. On a constaté un tassement des matériaux du remblai supérieur à 30 cm.

On construit de plus en plus de barrages en enrochements par la méthode appelée « Ita », qui met en oeuvre des peaux de béton extrudé à faible teneur en ciment (60 à 70 kg/m³) pour maintenir le remblai. Les peaux extrudées sont en général constituées de matériau de granularité unique permettant une haute transmissivité. Ces peaux extrudées fournissent une couche de support solide pour la mise en place et l'ancrage du dispositif d'étanchéité par géomembranes. Dans certains cas, un glissement s'est opéré à l'interface des peaux extrudées, formant un décalage du parement amont. Ce glissement s'est amorcé pendant la mise en place du remblai. Ces décalages éventuels doivent être pris en compte pour éviter les contraintes sur le DEG, surtout si la géomembrane est mise en place lorsque le remblai continue de monter et que le tassement n'est pas encore achevé. Les caractéristiques des peaux sont très importantes pour éviter des fissures consécutives après un tassement du remblai. De récentes observations de fissurations de peau à la suite de déformations montrent tout l'intérêt de recourir à des mélanges de faible résistance pour éviter les grandes fissures, qui se développent plus facilement dans les mélanges riches en ciment.

Les peaux extrudées peuvent permettre une installation aussi rapide qu'efficace du DEG, lorsqu'on met en oeuvre un système d'ancrage en parement par l'intermédiaire de « bandes » de géomembrane mentionnées au paragraphe 4.5.1.1. « Ancrage mécanique ».

Les « bandes » de géomembrane forment des lignes verticales d'ancrage auxquelles la géomembrane peut être fixée à l'aide d'un système breveté.

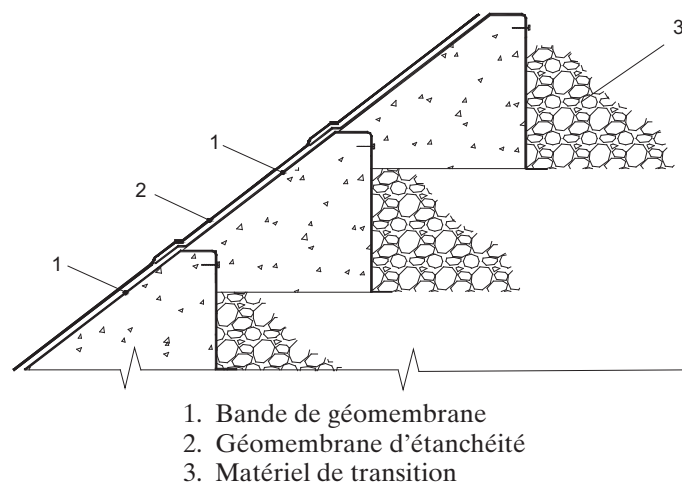
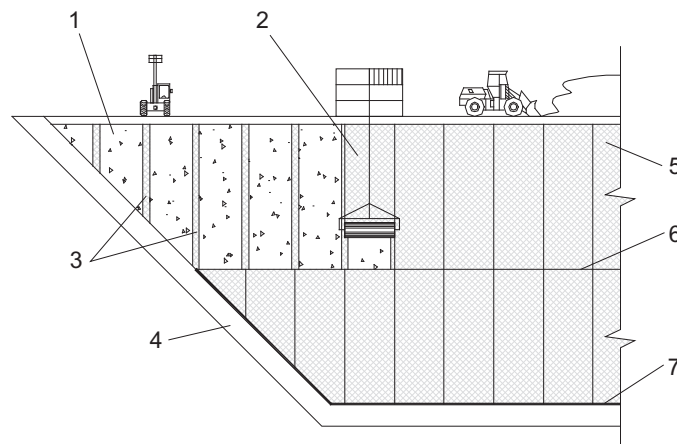


Fig. 62
Ancrage par bandes de géomembranes noyées dans le remblai

Le soudage horizontal pour le raccordement de lés adjacents est possible si les contraintes sont reprises par les lignes verticales d'ancrage, comme présenté dans la Fig. 63.



1. Surface de béton (peaux extrudées)
2. Lé de géomembrane en cours de mise en place
3. Lignes d'ancrage (bandes de géomembrane)
4. Plinthe béton
5. Lés de géomembranes soudés aux lignes d'ancrage (3)
6. Soudure horizontale étanche
7. Joint périphérique étanche

Fig. 63

Installation de lés de géomembrane sur des bandes de géomembrane

Il est possible de créer des compartiments dans la couche de support/drainage pour une meilleure surveillance des zones éventuelles de fuite.

Lors de la construction de nouveaux barrages à dispositif interne, les lés de géomembrane doivent être soudés l'un à l'autre sur site pour obtenir une étanchéité continue : la géomembrane doit donc être installée sur des surfaces préparées internes au barrage. Ceci peut être effectué pour un dispositif d'étanchéité incliné sur toute la hauteur, ou bien par étapes, en formant un zigzag. Dans tous les cas, le dispositif d'étanchéité par géomembranes est placé sur une surface exposée. Ainsi, l'installation du dispositif de géomembranes est semblable à celui du dispositif amont. La mise en place des couches sur la géomembrane interne est semblable à la mise en place d'une couche de couverture. Le niveau de compactage des couches adjacentes à la géomembrane doit être spécifié, pour éviter le transfert de contraintes au dispositif d'étanchéité par géomembranes (DEG).

Pour la réhabilitation de parements en dalles de béton ou en béton bitumineux, la géomembrane est placée directement sur la surface existante, sauf si un drainage et des couches anti-poinçonnement sont nécessaires. La surface sur laquelle le système d'étanchéité par géomembrane sera installé doit être nettoyée des saletés, des éléments friables et des zones en nid d'abeille, et les zones endommagées et détériorées doivent être réparées. Il est courant de placer une couche synthétique supplémentaire sous la géomembrane pour jouer un rôle de drainage et s'opposer au poinçonnement. En général, cette couche est un géotextile contrecollé sur la géomembrane pour renforcer sa résistance et sa stabilité dimensionnelle. Les joints de construction de la surface et d'éventuelles fissures n'ont pas besoin d'être bouchés car ils sont recouverts par cette couche de support nécessaire, qui peut être un géotextile ou une géomembrane « sacrifiée ».

Il n'est pas essentiel de préparer un support régulier et lisse pour la couche d'étanchéité, dans la mesure où le géotextile assure une protection pour la

géomembrane. Cependant, les protubérances aiguës et les angles doivent être éliminés pour éviter la concentration des contraintes, qui peuvent entraîner des dommages à la géomembrane (Banegon, France 1973 – construction et 1983 – réhabilitation).

Pour la réhabilitation de parements en béton bitumineux, la préparation de la surface de support pour les géomembranes demande tout d'abord une stabilisation. Il est nécessaire de détecter les cavités et les vides sous le béton bitumineux, et de les remplir pour éviter l'affaissement, voire la rupture du support. Si les cavités ne sont pas dues à l'eau pénétrant à travers le parement, celle-ci provenant d'une autre source, il est nécessaire de stopper l'écoulement d'eau sous le parement, par exemple en construisant un puits de drainage. Dans le cas où le béton bitumineux est composé de plus de deux couches avec une couche de drainage intermédiaire, qui peut localement se décoller ou glisser par rapport aux autres couches, il est recommandé d'éliminer les couches supérieures, par exemple par meulage, pour s'assurer que le support subsistant est homogène et stable. Si des réparations antérieures ont été effectuées, la stabilité de cette interface et l'élimination totale ou partielle des couches de réparation devra être également considérée. Les dépressions trop importantes doivent être bouchées. La préparation de la surface dépend également des caractéristiques de la géomembrane ; une géomembrane très élastique est préférable, car elle s'adapte mieux au support, minimise les risques de poinçonnement en certains points et l'éclatement dans les cavités, et donc réduit la préparation de la surface.

Avant l'installation de la géomembrane, il faut creuser et préparer les tranchées d'ancrage à la crête du barrage, à sa périphérie et en pied. Si la périphérie, la crête et le pied sont constitués d'ouvrages béton, les ancrages périphériques doivent être préparés.

S'il a été prévu un ancrage en parement de l'ensemble de la géomembrane, ce dispositif est installé sur la surface préparée. Le dispositif d'ancrage est de préférence installé verticalement sur le parement pour minimiser les tensions sur la géomembrane. L'espacement entre les lignes verticales d'ancrage dépend en général de critères comme la vitesse maximale du vent, la résistance de la géomembrane, et la résistance à l'arrachement de l'ancrage et du support suivant leurs types. Si un système de prétensionnement est utilisé avec une géomembrane PVC, on adopte le plus souvent un espacement d'environ 6 m pour éviter les déplacements, les ondulations, la formation de bulles voire l'apparition de plis sur la géomembrane.

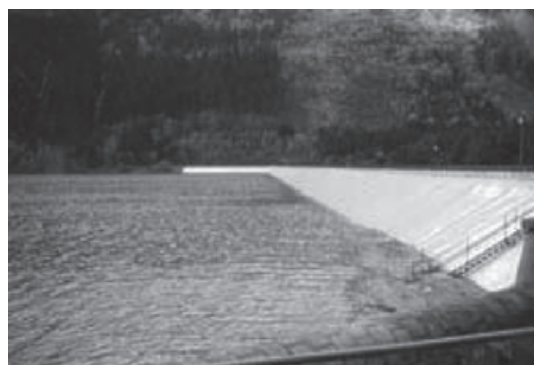


Fig. 64

Moravka, République Tchèque, 1999. Lés de géocomposite PVC ancrés avec un espacement de 6 m

En l'absence de prétensionnement, les lignes d'ancrages doivent être plus rapprochées.

Les trous pour l'ancrage sont forés dans la couche de base à une profondeur suffisante pour assurer la sécurité de celui-ci. Les chevilles d'ancrage en acier inoxydable fileté sont placées dans ces trous. On utilise en général des produits chimiques ou résines époxy à deux composants pour fixer les boulons, mais on peut également employer des ancrages mécaniques. Pour régulariser la base pour le dispositif de fixation, un mortier époxy ou autre matériau de support peut être utilisé. Il est fortement recommandé d'effectuer des tests d'arrachement à échelle réelle avant de choisir le dispositif d'ancrage. Pour le béton bitumineux, matériau visqueux, la résistance des ancrages doit être vérifiée à des températures correspondant aux maxima qui peuvent être observés sur le parement amont du barrage.

Pour la réhabilitation de barrages en remblai homogène, ou de barrages en remblai avec un dispositif d'étanchéité interne existant, une couche de base ou de support stable doit être mise en place sur la pente. La couche de base est généralement mise en place et compactée horizontalement, et la couche support verticalement.

4.5.2. Placement de la géomembrane

Pour permettre un bon contact entre le parement du barrage et la géomembrane sans rides, plis ou tension, on conseille généralement d'éviter l'installation en dehors de la plage de température + 5 °C à +35 °C. Les températures de mise en place dépendent du type de géomembrane utilisée.

De même, suivant la géomembrane, les températures de soudage seront différentes. Une géomembrane qui demande une plage restreinte de température de soudage peut affecter fortement le calendrier de mise en place.

En général, les rouleaux de géomembranes sont déroulés depuis la crête. Si la pente est inférieure à 1V/1,6H, des plateformes déplacées à l'aide de treuils ne sont pas forcément nécessaires. L'ancrage de la géomembrane à la périphérie et au pied du barrage est effectué par des ouvriers se déplaçant le long des fondations.

Conformément au plan d'installation, chaque lé de géomembrane est prédécoupé, ou fabriqué en usine à sa longueur approximative entre la crête et le pied pour éviter des soudures transversales et faciliter la mise en place sur le parement.

Les lés de géomembrane ou de géocomposite avec géotextile pré-assemblé sont positionnés sur la crête du barrage, conformément au programme d'installation, et sont descendus depuis celle-ci à l'aide de dispositifs de déroulement par treuil, de manière à ce que deux lés adjacents se superposent sur une largeur suffisante. Dans le cas d'un dispositif d'ancrage sur tout le parement, il est préférable de faire se superposer les deux lés sur les ancrages. Un ancrage provisoire en crête, et des lests positionnés sur la géomembrane permettent de la maintenir en place pour éviter le soulèvement par le vent et l'allongement provoqué par le poids mort. Quoi qu'il en soit, la géomembrane doit rester libre et ne doit pas être mise en tension. Lors du déroulement de la géomembrane, il faut éviter plis et ondulations qui

compliqueraient la soudure et réduirait le frottement et donc la stabilité de la géomembrane sur sa couche support. De plus, en cas de percement de la géomembrane, ces plis offriraient un chemin préférentiel pour la pénétration de l'eau.

Si on met en place un géotextile anti-poinçonnement indépendant de la géomembrane à étendre sur celui-ci, il sera également déroulé depuis la crête du barrage avant l'installation de la géomembrane. Les lés de géotextiles doivent se chevaucher au minimum de 0,15 m et peuvent être cousus ensemble.

On a noté des occurrences de géomembranes soulevées par le vent pendant l'installation. Pour des vitesses de vent élevées, il n'est plus possible de disposer assez de sacs de sable comme lest temporaire. Il n'y a pas de solution évidente, et la possibilité d'un déplacement des géomembranes par le vent doit être prise en compte dès les premières études : par exemple, cela peut inciter à choisir un géotextile pré-assemblé à la géomembrane en usine, au lieu d'un géotextile séparé, pour éviter le soulèvement de l'ensemble et un mauvais positionnement de la géomembrane sur un géotextile mis "en bouchon". Au moment de l'installation, cet aspect doit être discuté par toutes les parties avant de mettre en place la géomembrane. Le meilleur moment se situe lors de la réunion préalable à la construction qui rassemble toutes les parties impliquées. En cas de déplacement, il est alors possible de simplement repositionner la géomembrane, de ressouder ou de recoller des bandes sur les endroits déchirés, de vérifier si la géomembrane est endommagée sur les plis ou les déformations les plus importantes, ou (dans le pire des cas) de rejeter les rouleaux ou lés impliqués. Il faut cependant noter que ce rejet peut provoquer un retard du projet, car l'installateur n'aura probablement pas de matériau de remplacement sous la main. De plus, il faut qu'ait été évoqué de manière franche et exhaustive à la réunion précédant le chantier les responsabilités financières pour le remplacement des géomembranes : les risques de dommages provoqués par le vent ne peuvent être écartés lors de l'installation, et doivent donc être gérés. Cela suppose de trouver un équilibre dans les procédures d'installation entre la probabilité et les conséquences de ces dommages, et le calendrier et les coûts de cette installation. Pour les géomembranes exposées, le vent est un paramètre dont il faut tenir compte également après la mise en place du DEG, comme indiqué au § 4.3.6.

Les contraintes à la mise en place et les déformations associées sont importantes et doivent être prises en compte. Des allongements dus à la température, à l'évolution de l'ensoleillement et au poids mort de la géomembrane vont se produire. S'ils sont supérieurs à 2 % ils risquent d'entraver la mise en place et le soudage. Les mesures visant à minimiser les contraintes et l'allongement sont donc essentielles.

Une géomembrane avec un faible coefficient de dilatation thermique est préférable.

Lorsque la géomembrane est correctement positionnée, les lés adjacents sont soudés les uns aux autres. Dans la mesure du possible, la soudure doit être de type double automatique, ce qui permet son contrôle global. Les soudures manuelles simples ne seront utilisées que dans les coins, et là où la machine de soudure

automatique double n'a pas accès. Le soudage ne doit être exécuté qu'en absence de précipitations, ou sous abri.

Pendant le placement de la géomembrane et son ancrage sur le parement du barrage, elle reste maintenue sur la crête sans être fixée de manière permanente. On la maintient donc en crête et sur les appuis par un dispositif de fixation simple ou en la noyant dans une tranchée d'ancrage. L'ancrage périphérique définitif ne peut être effectué avant que l'ancrage sur le parement n'ait été terminé.

Lorsque la géomembrane est couverte, un géotextile épais sera placé sur sa face supérieure, soit sur toute la surface de la géomembrane, soit uniquement sur certaines portions.



Fig. 65

Barrage Bovilla, Albanie 1996, nouvelle construction : des dalles de béton non renforcées sont coulées directement sur un géotextile qui protège le géocomposite PVC lors du bétonnage

4.6. EXEMPLES TYPIQUES

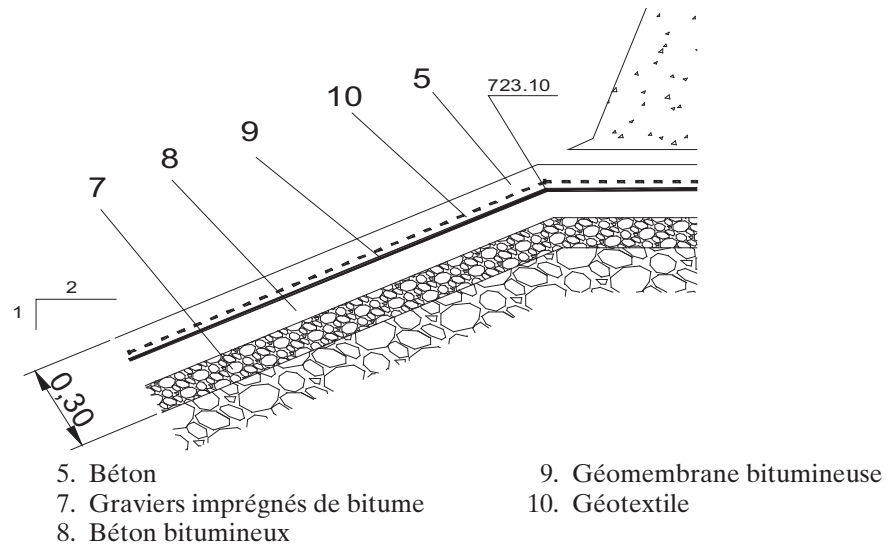
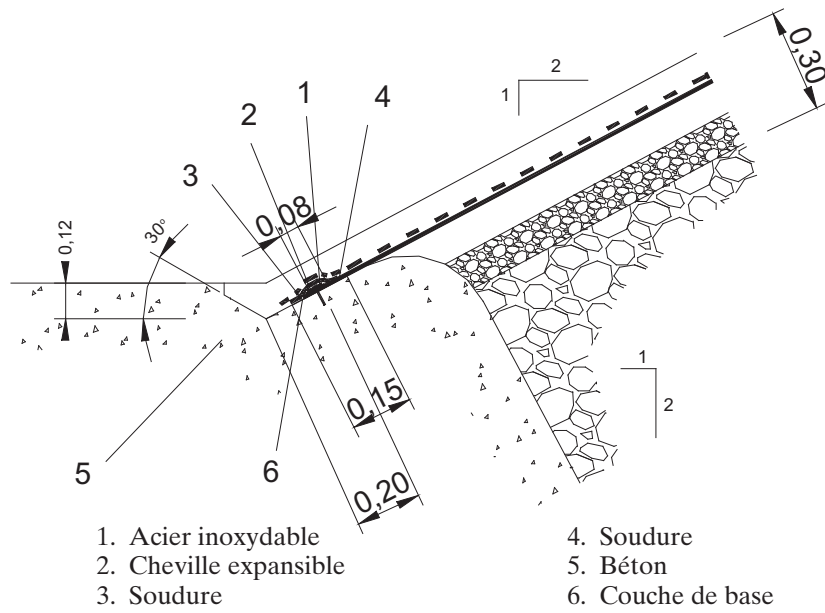
4.6.1. Nouvelle construction, géomembrane bitumineuse couverte

Annexe 1 : barrage de la Galaube (France)

Nouveau barrage en enrochement étanchéifié par une géomembrane bitumineuse.

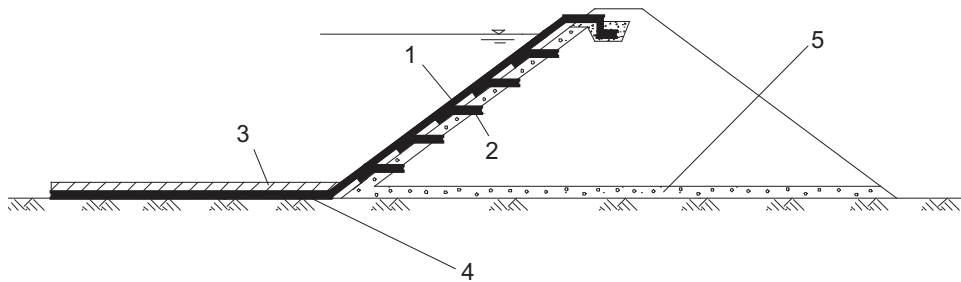


Vue générale du barrage pendant la construction du dispositif d'étanchéité

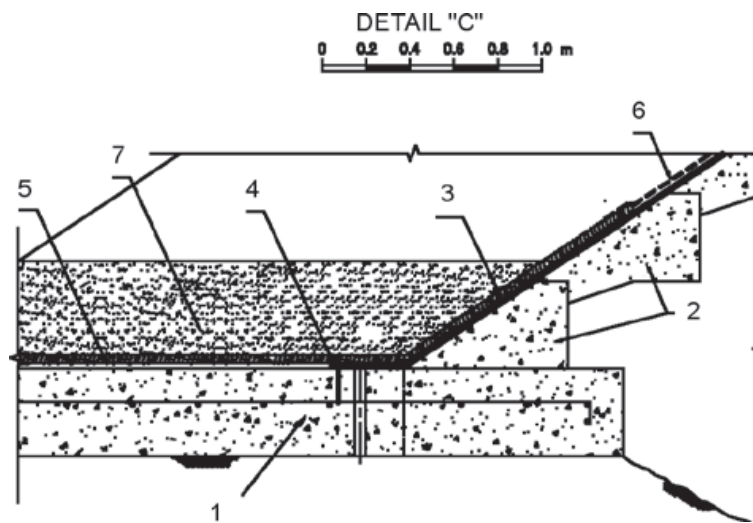


4.6.2. Nouvelle construction, géomembrane PVC exposée

Annexe 1 : barrage d'Alento (Italie)



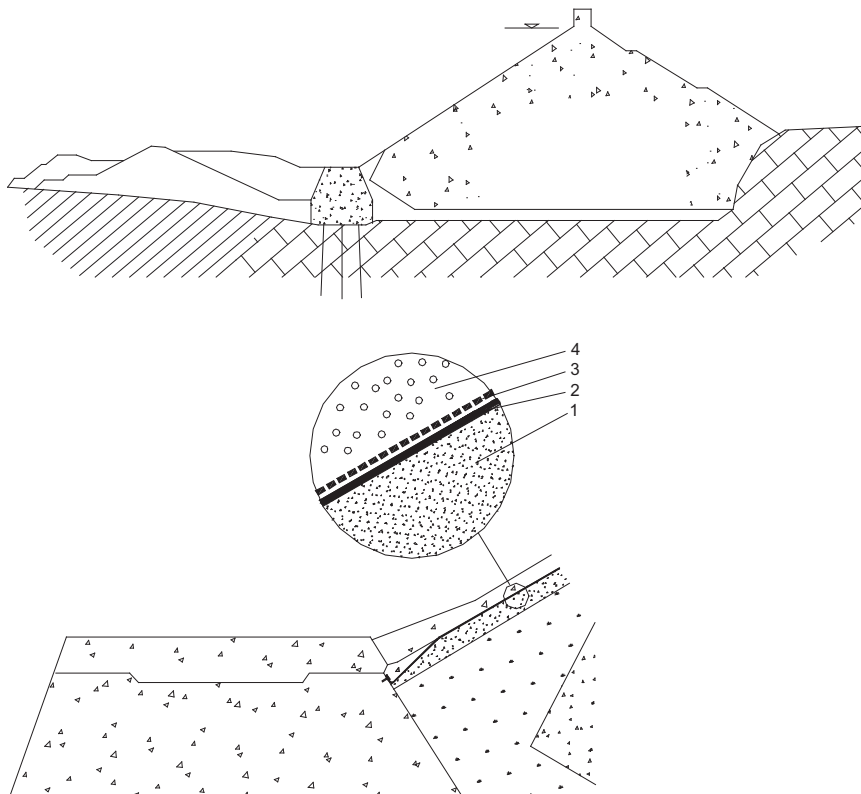
Annexe 1 : barrage de Sar Cheshmeh (Iran)



- | | |
|--|--|
| 1. Massif de pied en béton armé | 4. Ancrage périmétral inférieur |
| 2. Rebords en béton poreux | 5. Couche GCL |
| 3. Géocomposite PVC (géomembrane PVC
3,0 mm + géotextile 500 g/m ²) | 6. Géotextile (non nécessaire au-delà de 2181.3) |
| | 7. Remblai |

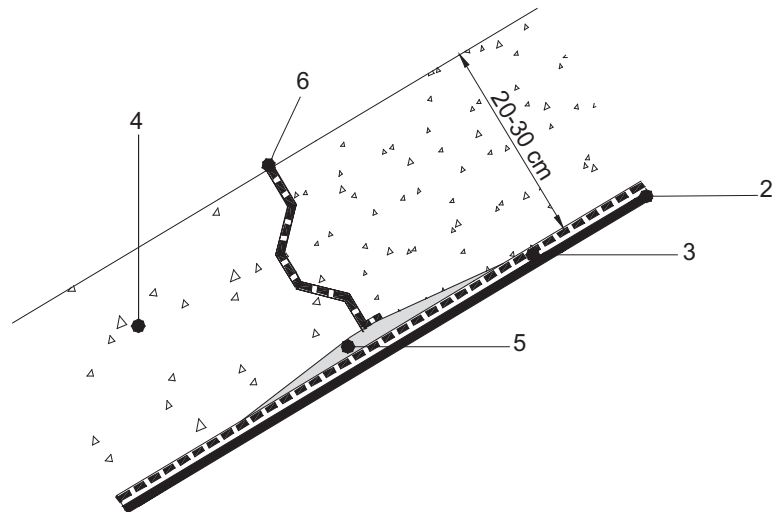
4.6.3. Nouvelle construction, géomembrane PVC couverte

Annexe 1 : barrage de Bovilla (Albanie)



SECTION STANDARD

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. Graves stabilisés | 3. Géotextile |
| 2. Géocomposite PVC (géomembrane PVC
3 mm + géotextile 700 g/m ²) | 4. Dalle en béton non renforcé |

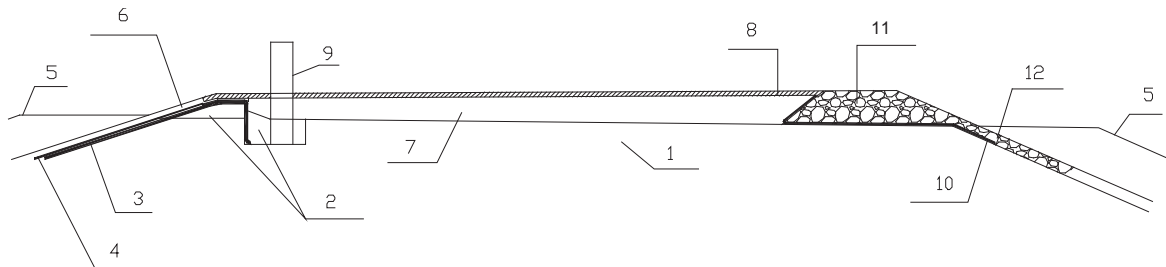


SECTION À JOINT ENTRE LES DALLES

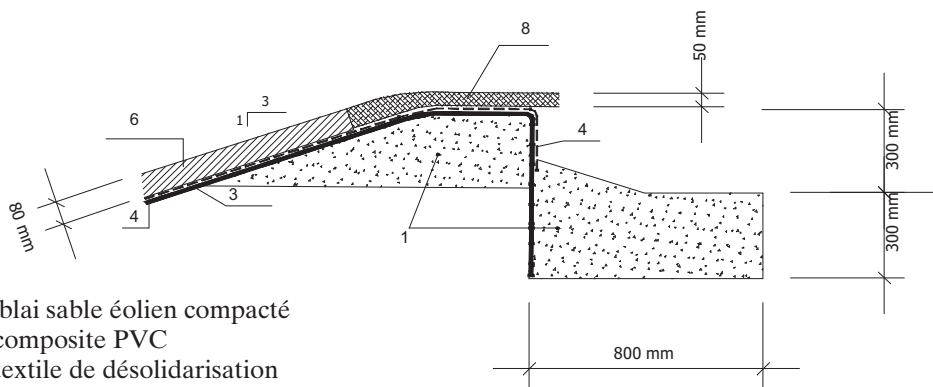
- | | |
|---------------------------------|--|
| 2. Géocomposite PVC | 5. Coin polystyrène |
| 3. Géotextile | 6. Joint drainant ouvert avec géotextile |
| 4. Dalle en béton non renforcée | |

4.6.4. Nouvelle construction, géomembrane PVC couverte

Annexe 1: barrage et réservoir de Jibiya (Nigeria)

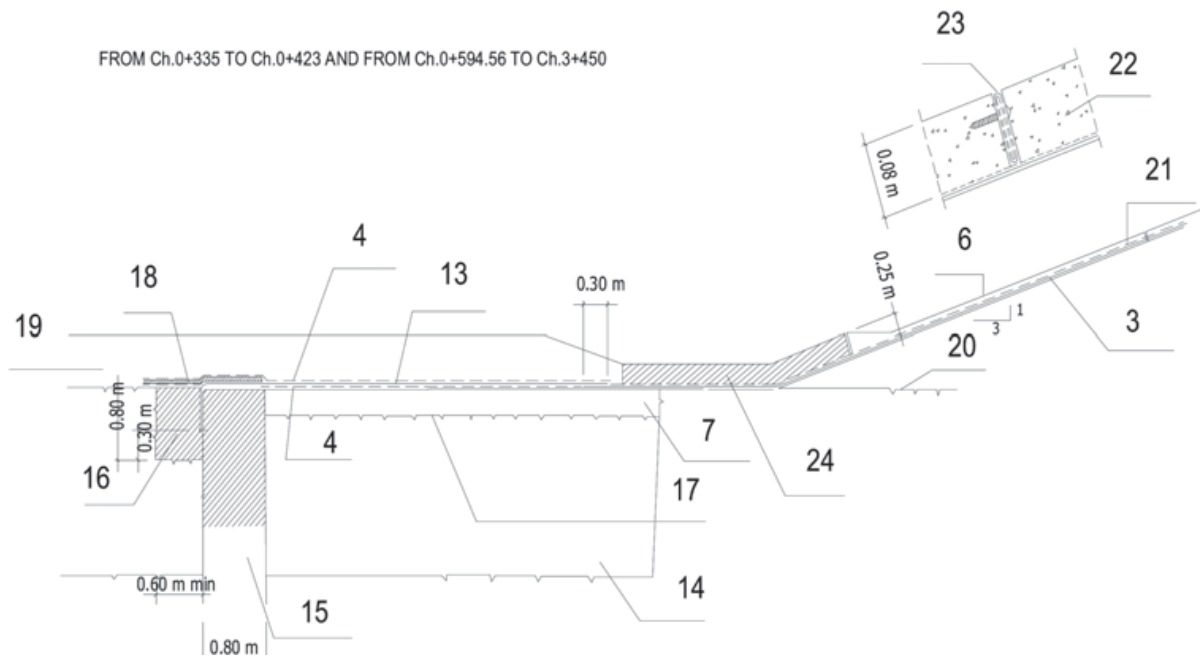


- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. Remblai sable éolien compacté | 7. Sable de rivière compacté |
| 2. Sable éolien compacté | 8. Radier bitumineux |
| 3. Revêtement géocomposite PVC | 9. Pilier béton |
| 4. Géotextile de désolidarisation | 10. Géotextile séparateur |
| 5. Profil remblai | 11. Protection rochers sélectionnés |
| 6. Protection dalle béton non renforcée | 12. Pierres de petite dimension |



- | |
|--|
| 1. Remblai sable éolien compacté |
| 3. Géocomposite PVC |
| 4. Géotextile de désolidarisation |
| 6. Protection dalle béton non renforcé |
| 8. Radier bitumineux |

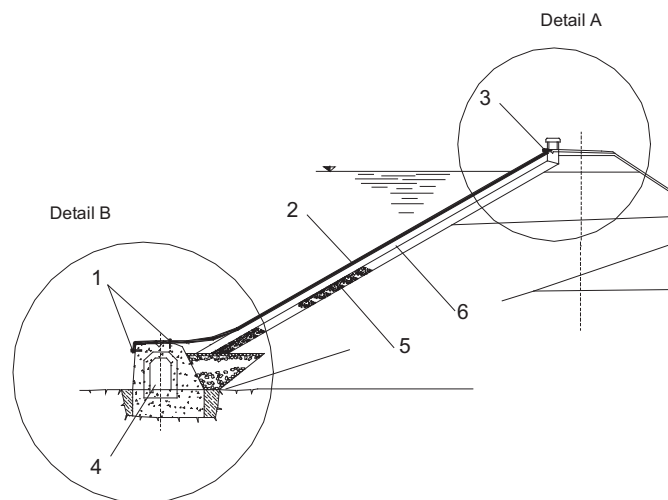
FROM Ch.0+335 TO Ch.0+423 AND FROM Ch.0+594.56 TO Ch.3+450



- | | |
|--|---|
| 13. Géomembrane PVC épaisseur 2 mm | 19. Sable éolien avec > 20 % fines compactées |
| 14. Fondation recompactée | 20. Fondation granuleuse |
| 15. Paroi étanche plastique (auto durcissement de la boue) | 21. Géotextile de désolidarisation |
| 16. Remblai avec mélange pour paroi étanche | 3. Géocomposite (géomembrane PVC épaisseur 2 mm + géotextile) |
| 17. Creusé juste avant de placer le géotextile et la géomembrane PVC | 6. Dalles de béton non renforcées coulées sur place 2,00 × 4,00 (détail de 6) |
| 7. Sable de rivière compacté | 23. Géotextile cloué sur place (4 plis) |
| 4. Géotextile | 24. Dalle de béton en pied |
| 18. Mélange bentonique | |

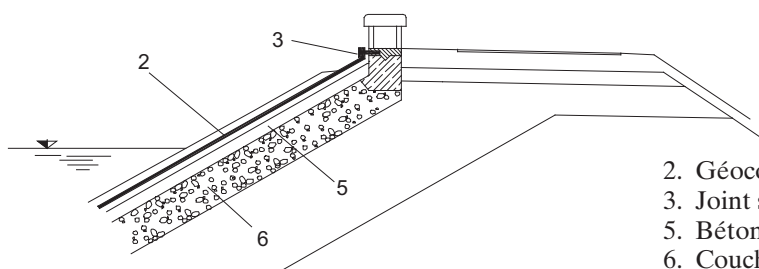
4.6.5. Réparation, géomembrane PVC exposée

Annexe 1 : barrage de Moravka (République tchèque)



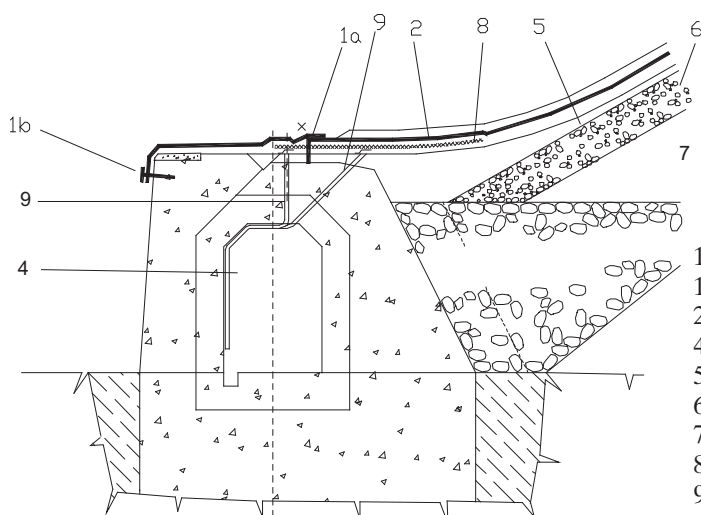
1. Joints périphériques étanches en pied
2. Géocomposite (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile 500 g/m²)
3. Joint supérieur
4. Galerie de drainage
5. Béton bitumineux existant
6. Couche de support/ de drainage

DETAIL A

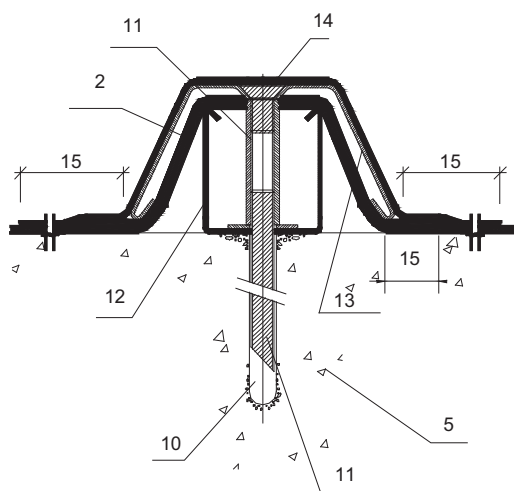


- 2. Géocomposite PVC
- 3. Joint supérieur
- 5. Béton bitumineux existant
- 6. Couche de support/ de drainage

DETAIL B



- 1a. Joint périphérique primaire
- 1b. Joint périphérique secondaire
- 2. Géocomposite PVC
- 4. Galerie de drainage
- 5. Béton bitumineux existant
- 6. Couche de support/ de drainage
- 7. Barrage en terre
- 8. Géofilet de drainage
- 9. Evacuation de drainage pour la géomembrane

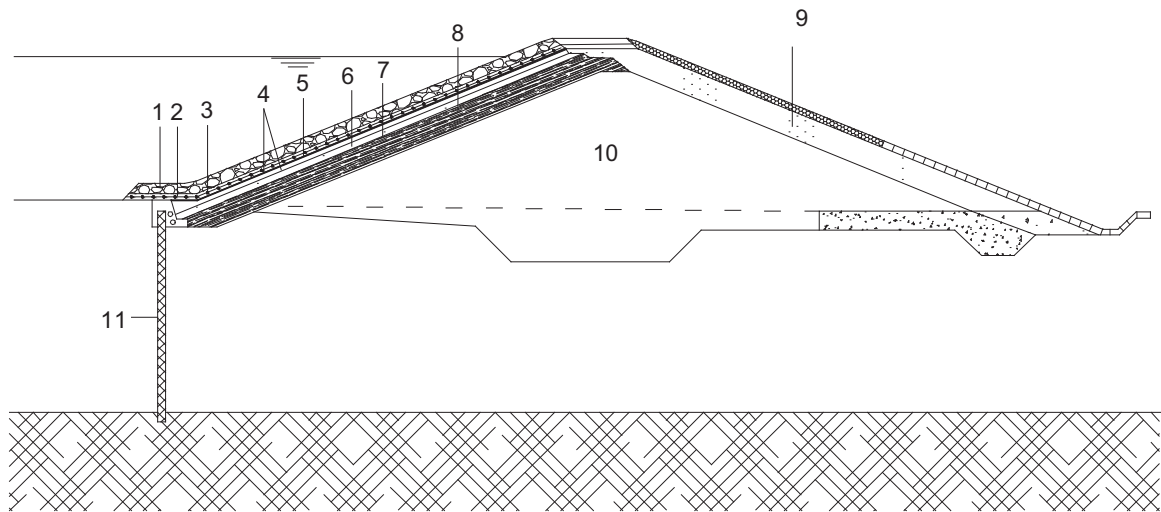


- 5. Béton bitumineux existant
- 10. Coulis chimique
- 11. Ancrage inox
- 12. Profil d'intrados en inox
- 2. Géocomposite d'étanchéité en PVC
- 13. Profil d'extrados en inox
- 14. Couvre-joint en PVC
- 15. Soudure

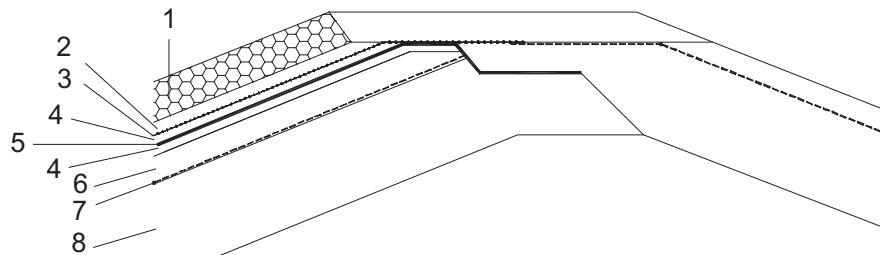
Detail du système de tensionnement breveté sur le parement amont

4.6.6. Réparation, géomembrane PVC couverte

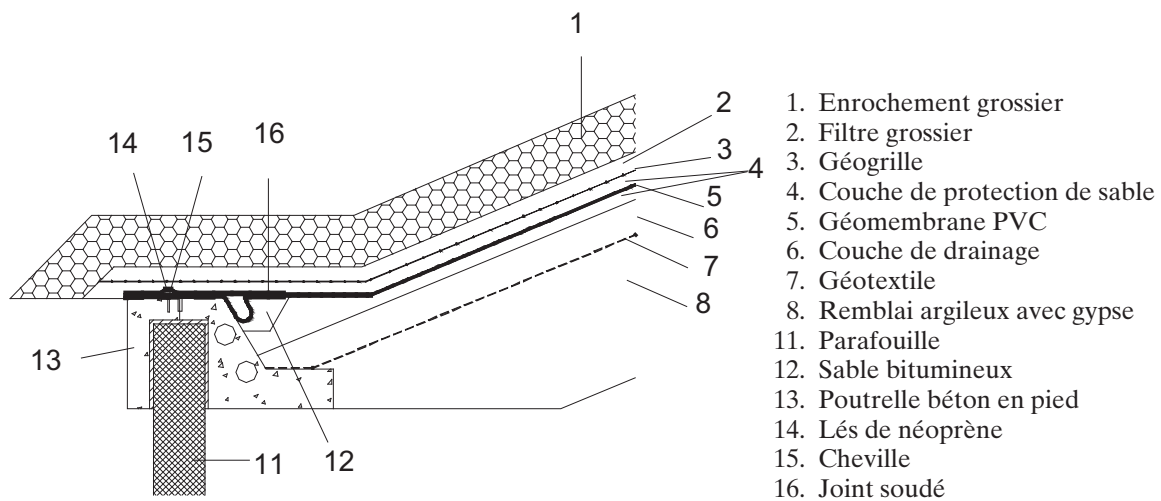
Annexe 1 : barrage de Mafeteng (Lesotho)



- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Enrochement grossier | 7. Géotextile |
| 2. Filtre grossier | 8. Remblai argileux avec gypse |
| 3. Géogrille | 9. Couche argileuse |
| 4. Couche de protection de sable | 10. Barrage existant |
| 5. Géomembrane PVC | 11. Parafouille |
| 6. Couche de drainage | |



- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Enrochement grossier | 5. Géomembrane PVC |
| 2. Filtre grossier | 6. Couche de drainage |
| 3. Géogrille | 7. Géotextile |
| 4. Couche de protection de sable | 8. Remblai argileux avec gypse |



- | |
|----------------------------------|
| 1. Enrochement grossier |
| 2. Filtre grossier |
| 3. Géogrille |
| 4. Couche de protection de sable |
| 5. Géomembrane PVC |
| 6. Couche de drainage |
| 7. Géotextile |
| 8. Remblai argileux avec gypse |
| 11. Parafouille |
| 12. Sable bitumineux |
| 13. Poutrelle béton en pied |
| 14. Lés de néoprène |
| 15. Cheville |
| 16. Joint soudé |

5. GÉOMEMBRANES SUR LES BARRAGES BÉTON ET MAÇONNERIE

Ce chapitre présente l'utilisation de géomembranes pour la construction de nouveaux barrages et la réhabilitation de barrages anciens. Ce chapitre se limite aux barrages en béton ou en maçonnerie. Les barrages en BCR sont abordés au Chapitre 6.

Les principes de conception et d'installation sont similaires pour l'utilisation de géomembranes sur des nouvelles constructions ou sur des réhabilitations, et sont donc décrites ensemble. On notera qu'à l'heure actuelle, il n'existe pas de nouveau barrage en béton conventionnel intégrant une géomembrane, à l'exception de 2 applications partielles au pied.

Selon le Tableau 29 ci-dessous, il existe 47 barrages en béton ou en maçonnerie intégrant une géomembrane d'étanchéité.

Tableau 29
DEG sur les barrages en béton et en maçonnerie

Barrage		TOTAL	PVC	PELBD	CSM	CPE-R	Sur site
Poids	Exposées	29	28	0	0	0	1
	Couvertes	1	1	0	0	0	0
Contreforts	Exposées	3	3	0	0	0	0
	Couvertes	0	0	0	0	0	0
Voûte	Exposées	4	3	0	1	0	0
	Couvertes	4	0	2	1	1	0
Voûte multiple	Exposées	6	6	0	0	0	0
	Couvertes	0	0	0	0	0	0
Installation la plus grande [m ²]			17 000	17 325	9 000	400	4 000
Barrage le plus élevé [m]			174	185	200	70	46,50
Installation la plus ancienne			1974	1981	1981	Non connu	1979
Installation la plus récente			2006 *	Non connu	1986		

* Installation of exposed and covered systems continuing up to date.

5.1. GAMME D'APPLICATIONS

5.1.1. Applications dans la construction de nouveaux barrages

On considère généralement que les barrages conventionnels en béton, en raison de leur haute teneur en ciment, sont étanches et qu'une étanchéité supplémentaire n'est pas nécessaire.

Dans les barrages en maçonnerie, le mortier composant les joints des pierres est plus perméable que le béton, et permet donc des percolations d'eau du réservoir : des dispositifs d'étanchéité additionnels sont souvent nécessaires. Les premiers barrages en maçonnerie, conçus au début du XX^e siècle par le professeur Intze, étaient étanchéifiés au moment de la construction avec un revêtement en mortier sur le parement amont pour réduire l'infiltration de l'eau du réservoir. Plus tard, le parement amont des barrages en maçonnerie a été étanchéifié par un revêtement en béton projeté. Actuellement, on considérerait sans doute un dispositif d'étanchéité par géomembranes comme une solution techniquement fiable et économique pour remplacer le béton projeté. Cependant, on ne construit pas aujourd'hui de nouveaux barrages en maçonnerie. Les nouveaux barrages en béton sont construits en général en utilisant des techniques BCR, et sont présentés au Chapitre 6.

5.1.2. Applications pour la réhabilitation des barrages

Comme le mentionnent d'autres bulletins CIGB, il existe plusieurs raisons pour lesquelles un barrage peut perdre son étanchéité. Les eaux relativement douces du réservoir font baisser la résistance du ciment, surtout dans les barrages en maçonnerie ; dans les climats froids présentant des cycles gel/dégel, la dilatation de l'eau infiltrée dans le barrage provoque écaillage et fissures en parement amont, ce qui permet une infiltration accrue de l'eau du réservoir, et provoque une détérioration du béton du barrage. Les réactions alcali-granulats, liées à la percolation de l'eau à travers le barrage, endommagent le béton par dilatation. De nombreux barrages en béton ou en maçonnerie souffrent de défauts d'étanchéité au niveau des joints.

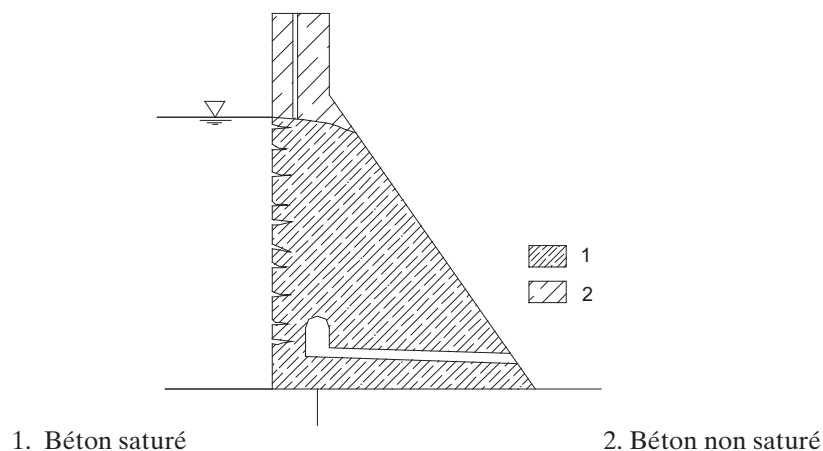


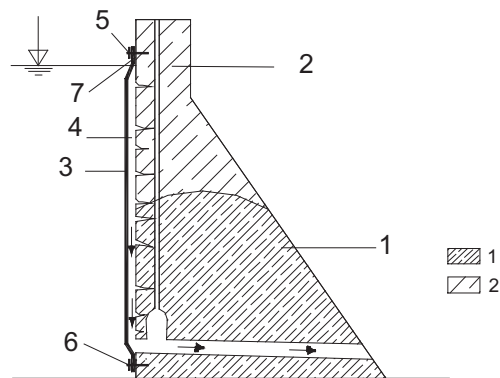
Fig. 66

Comportement au cours du temps : les drains percés ne collectent pas toute l'eau infiltrée, qui pénètre dans le corps du barrage

Lorsque l'on envisage la réhabilitation d'anciens barrages détériorés en béton ou maçonnerie, il est nécessaire de prévoir un dispositif d'étanchéité pour éviter les infiltrations et réduire les agressions exercées par l'eau sur le parement amont. Les géomembranes, d'une épaisseur de quelques millimètres seulement, placées sur le parement amont des barrages, se sont révélées très efficaces pour assurer la même fonction d'étanchéité que plusieurs mètres de béton. L'option géomembrane non seulement évite des frais directs lors des opérations de réhabilitation, mais également des frais indirects en raison du calendrier d'installation beaucoup plus court pour un dispositif d'étanchéité par géomembranes que pour une couche de béton.

Les deux principaux objectifs d'un dispositif par géomembranes pour la réhabilitation d'anciens barrages sont :

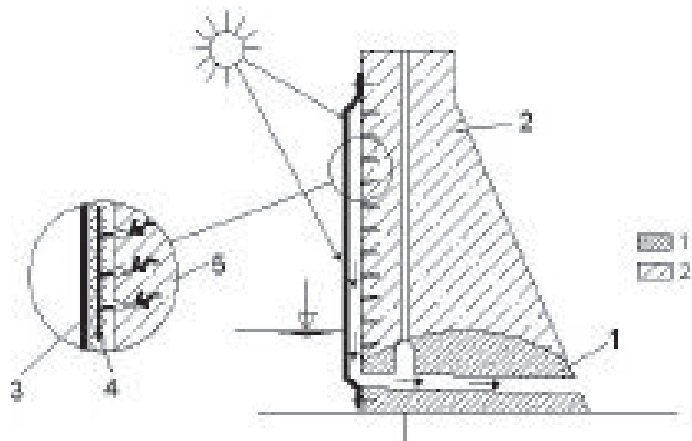
- Étanchéifier le barrage pour éviter des détériorations ultérieures du mortier des barrages en maçonnerie, et du ciment des barrages en béton ; cela peut contribuer d'ailleurs à freiner les alcali-réactions du béton (Pracana, Chambon)
- Intercepter les infiltrations de l'eau du réservoir à travers le barrage, qui provoquent des sous-pressions dans le corps du barrage et donc des problèmes de stabilité (Chambon, Illsee, etc) ; les infiltrations peuvent découler de défaillances d'étanchéité des joints (Vale do Rossim), de fissures dans le béton ou le ciment ou mortier poreux (Barbellino, Molato), ou de cavités ouvertes causées par la dissolution des liants entre les agrégats des anciens barrages (Beli Iskar, Kadamparai).



1. Béton saturé
2. Béton non saturé
3. Géomembrane
4. Vide pour drainage
5. Joint périphérique
6. Joint périphérique étanche
7. Ouverture de ventilation

Fig. 67

Comportement après l'installation de la géomembrane imperméable

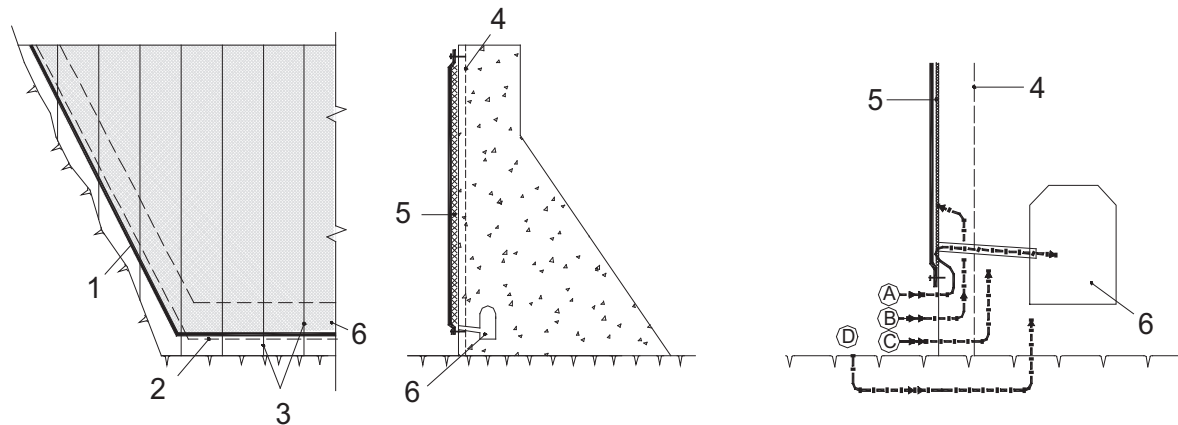


1. Béton saturé
2. Béton non saturé
3. Géomembrane (très faible perméabilité)
4. Couche de drainage (haute transmissivité)
5. Corps du barrage (haute perméabilité)

Fig. 68

Assèchement progressif du barrage

L'imperméabilité de la géomembrane associée au drainage du dispositif d'étanchéité permet un contrôle efficace des infiltrations en provenance du réservoir à travers le parement amont du barrage. Des infiltrations d'eau en bordures et dans la fondation du barrage peuvent cependant encore se produire à travers des zones bétonnées non protégées, des fissures ou des fractures de rochers. L'eau peut également contourner le joint périphérique du dispositif d'étanchéité par géomembranes par des joints et fissures non traitées, comme indiqué dans la Fig. 69.



1. Limite inférieure du géocomposite étanche
2. Limite inférieure de la galerie de visite
3. Joints verticaux (supposés étanches)
4. Waterstop dans le joint
5. Géofilet de drainage
6. Galerie de visite / drainage

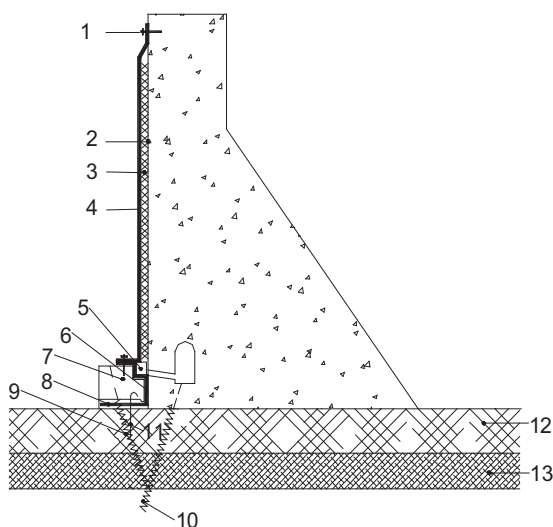
Chemins d'infiltration

- A À travers les joints du béton, l'eau rejoint le dispositif de drainage
- B À travers les joints verticaux, l'eau est arrêtée par les waterstops, s'élève et rejoint le dispositif de drainage
- C À travers des waterstops défaillants, l'eau se disperse dans le corps du barrage
- D À travers la fondation, l'eau se disperse dans le corps du barrage

Fig. 69

Infiltration à travers les zones non revêtues

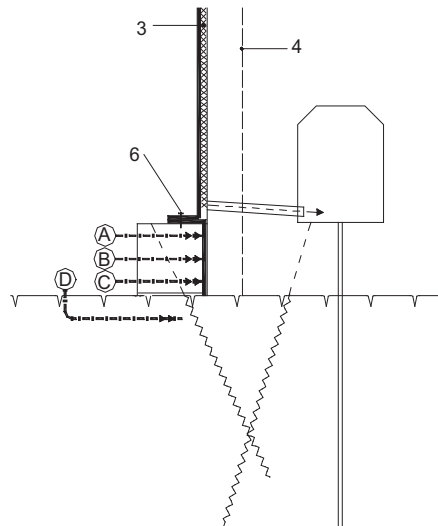
Un traitement est nécessaire, par des mesures de type injection des joints et des fissures interceptant les limites du DEG, installation d'une nouvelle plinthe béton ancrée et scellée par injection à la couche de fondation, et drainage de cette dernière.



1. Joint périphérique supérieur
2. Surface existante
3. Vide et couche de drainage
4. Géomembrane étanche (exposée)
5. Dispositif de collecte de l'eau
6. Géomembrane étanche (couverte)
7. Nouvelle poutrelle béton
8. Injection de scellement
9. Écran étanche superficiel
10. Ancrage étanche
11. Ancrage
12. Couche de fondation
13. Couche imperméable

Fig. 70

Grâce à la géomembrane et à la nouvelle plinthe scellée, la barrière étanche est continue depuis la crête jusqu'à la fondation



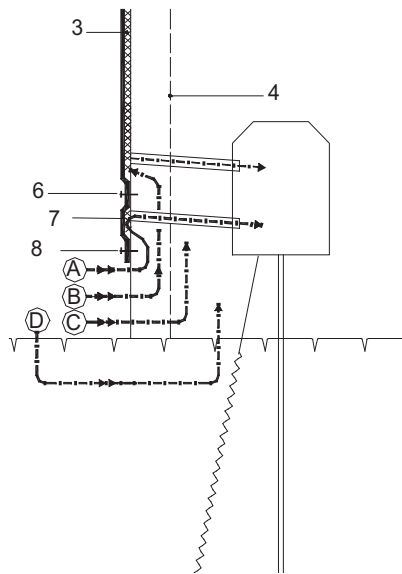
- 3. Couche de drainage
- 4. Waterstop dans le joint
- 6. Joint périphérique

Chemins d'infiltration

- A. À travers les joints du béton, stoppés par la géomembrane d'étanchéité derrière la plinthe
- B. À travers les joints verticaux, stoppés par la géomembrane d'étanchéité derrière la plinthe
- C. À travers les waterstops défectueux, stoppés par la géomembrane d'étanchéité derrière la plinthe
- D. À travers la fondation : stoppés par l'injection supplémentaire superficielle à partir de la plinthe

Fig. 71

Tous les chemins d'infiltration sont stoppés par la nouvelle plinthe scellée par injection



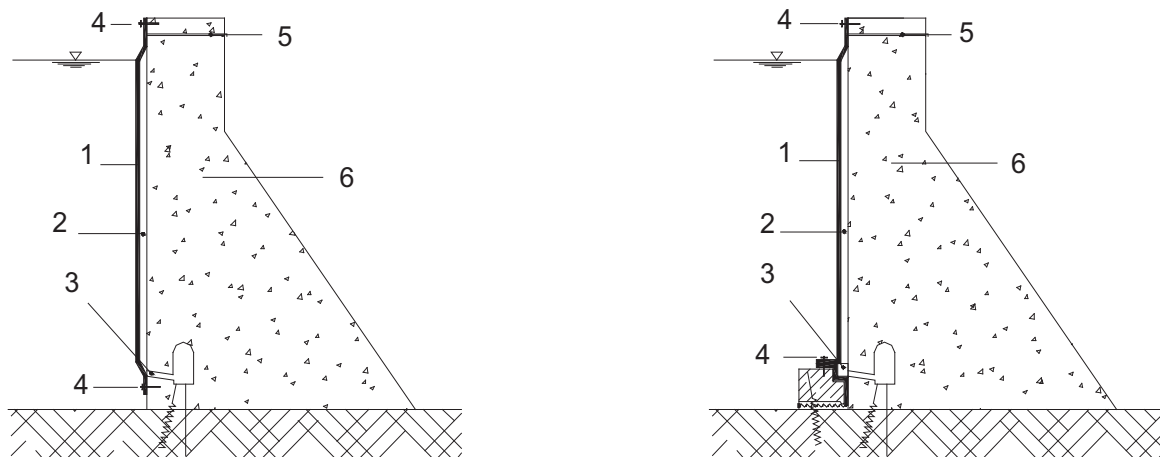
- 3. Couche de drainage
- 4. Waterstop dans le joint
- 6. Joint périphérique supérieur (primaire)
- 7. Evacuation du drainage de la fondation
- 8. Joint périphérique inférieur (secondaire)

Chemins d'infiltration

- A À travers les joints du béton, l'eau rejoint le dispositif de drainage de la fondation
- B À travers les joints du béton, l'eau rejoint le dispositif de drainage de la fondation
- C À travers les waterstops défectueux, l'eau rejoint le dispositif de drainage de la fondation
- D À travers la fondation : une fois dans le corps du barrage, l'eau est capturée par le dispositif de drainage de la fondation

Fig. 72

Chemins d'infiltration stoppés par le drainage des fondations



1. Géomembrane
2. Espace pour le drainage
3. Évacuation pour le drainage
4. Joints périphériques
5. Ventilation
6. Corps du barrage

Fig. 73

Coupes classiques de réhabilitation de barrages en béton

L'utilisation de dispositifs d'étanchéité par géomembranes synthétiques dans le cadre de réhabilitations a débuté en 1969 avec l'installation d'une géomembrane poly-isobuthylène pour rétablir l'étanchéité du barrage de Baitone, d'une hauteur de 37 m en Italie (remplacée en 1994 par une géomembrane PVC exposée). En 1991, le Bulletin 78 de la CIGB mentionnait un total de sept installations de géomembranes pour la réhabilitation de grands barrages béton et maçonnerie. En 2006, des dispositifs d'étanchéité par géomembrane ont été installés sur 47 barrages en béton ou maçonnerie (voir Tableau 29), et d'autres ont été installés ou sont en cours d'installation en 2007-2010.

5.2. PRINCIPES DE CONCEPTION

Non seulement, les matériaux des barrages en béton ou maçonnerie peuvent être détériorés par l'eau s'infiltrant dans le barrage, mais la stabilité peut être réduite par une montée de la pression hydrostatique dans le corps du barrage. Autrefois, on considérait en général que la pression hydrostatique passait linéairement de 100 % sur le parement amont pour atteindre zéro (ou la hauteur d'eau aval) au pied aval du barrage. On considérait qu'on avait une réduction de deux tiers de la pression hydrostatique du réservoir sur une ligne de drainage interne. Selon « Design of Gravity Dams », ouvrage rédigé par le Corps of Engineers (1995), on peut considérer que la pression est réduite de moitié directement derrière le parement amont des barrages traditionnels en béton. L'installation d'un dispositif d'étanchéité imperméable sur le parement amont, éventuellement avec une géomembrane drainée, permet de réduire de 100 % la pression hydrostatique sur le parement amont en raison de la perméabilité extrêmement faible de la géomembrane et des effets du dispositif de drainage.

La réduction potentielle des sous-pressions par l'utilisation d'un dispositif d'étanchéité par géomembranes drainé installé en parement amont du barrage peut permettre une conception plus économique. Il faut prendre en compte l'impact sur

les conditions hydrauliques du barrage d'une dégradation importante de la géomembrane.

Les géomembranes peuvent être mises en œuvre pour étanchéifier des barrages en béton ou en maçonnerie sans limitation de hauteur. Le plus haut barrage en béton équipé d'une géomembrane est Kölbrein, 200 m (Autriche 1981-1985), où la géomembrane est utilisée comme waterstop élastique entre le corps du barrage et une nouvelle dalle en béton construite pour des raisons de stabilité. Le plus haut barrage en béton équipé d'une géomembrane exposée sur le parement amont est Alpe Gera, 174 m (Italie, 1994).

Le dispositif d'étanchéité par géomembranes est toujours placé en position amont sur le parement du barrage.

Les spécifications principales s'appliquant au dispositif d'étanchéité par géomembranes sont :

- L'étanchéité, fournie par la géomembrane et son raccordement étanche à la structure du barrage
- La mise en place d'un drainage derrière la géomembrane pour recueillir d'éventuelles fuites
- La ventilation dans la couche drainante derrière la géomembrane pour équilibrer les variations de pression atmosphérique, pour éviter l'augmentation de la pression de vapeur et permettre un écoulement de drainage libre
- L'ancrage de la géomembrane pour résister aux contraintes (vent, vagues, débris flottants, glace, etc.)
- Le cas échéant, la couche de couverture externe optionnelle.

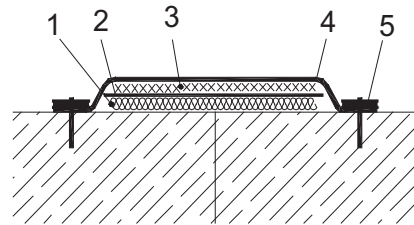
Le dispositif d'étanchéité par géomembranes est divisé en trois groupes principaux :

- Dispositifs partiels d'étanchéité
- Dispositifs d'étanchéité exposés
- Dispositifs d'étanchéité couverts.

5.2.1. Dispositifs partiels d'étanchéité

Les dispositifs partiels d'étanchéité sont théoriquement utilisés pour rendre étanches certains joints comme le joint périphérique des parements béton (Kölnbrein, Autriche), les joints entre les dalles des barrages en enrochement à parement béton (Turimiquire, Vénézuëla, Strawberry, États-Unis), ou joints de dilatation présentant une étanchéité défailante (Vale do Rossim), ou fissures dans le parement en béton (Dona Francisca, Platanovryssi) ou comme waterstop externe pour les joints de dilatation des barrages BCR (Porce II). Les études et constructions des dispositifs partiels d'étanchéité sont spécifiques à chaque site. La plupart du temps, le dispositif est constitué d'une bande de géomembrane de largeur suffisante pour couvrir le joint ou la fissure, au minimum 40 cm. La bande est fixée au parement béton du barrage par de simples dispositifs de serrage par compression, c'est-à-dire que la géomembrane est serrée entre le béton et un plat en acier inoxydable, avec un joint plat pour répartir la pression. Pour permettre une

meilleure répartition de la compression, notamment pour une surface inégale de béton, cette dernière est lissée par application d'une résine époxy ou par meulage. Le profilé acier est fixé au parement béton par des ancrages en acier inoxydable, chimiques ou mécaniques. Les caractéristiques et les dimensions des ancrages aciers les plus fréquemment utilisés sont indiquées au Chapitre 5.4.5.



1. Couche antipoinçonnement
2. Couche de support
3. Couche drainante
4. Géomembrane
5. Joint périphérique

Fig. 74

Schéma d'un dispositif partiel d'étanchéité

Une autre utilisation courante des dispositifs partiels consiste à mettre en place une géomembrane pour confiner le mastic des joints des barrages en enrochement à masque amont. Dans cette situation, ce n'est pas la géomembrane qui assure l'étanchéité, mais les joints mastic et les waterstops noyés. Les détails de cette application n'entrent pas dans le cadre de ce Bulletin.

5.2.2. Dispositifs d'étanchéité exposés

La composition des géomembranes actuelles comprend des additifs qui garantissent une haute résistance aux UV. En conséquence, il est possible d'installer des dispositifs exposés d'étanchéité par géomembrane, en faisant abstraction de la couche de couverture qui engendre des coûts supplémentaires, et dont la mise en place est souvent susceptible d'endommager la géomembrane. Les principaux atouts d'un dispositif d'étanchéité exposé consistent en des coûts de construction inférieurs, la possibilité d'inspection visuelle de la géomembrane et l'accès facile à cette dernière pour des interventions en cas de fuite intempestive. Pour la réhabilitation, l'installation rapide du système d'étanchéité permet de n'interrompre que brièvement l'exploitation du réservoir. Théoriquement, la faiblesse consiste en une certaine vulnérabilité du dispositif d'étanchéité qui peut être endommagé par vandalisme, chute d'objets jetés de la crête ou des appuis, ou par l'impact de débris se trouvant dans le réservoir. Toutefois, nous ne connaissons pas d'exemples de géomembranes endommagées en cours d'exploitation, c'est pourquoi l'installation d'une couche de protection demande d'autres justifications.

5.2.3. Dispositif d'étanchéité couvert

Il n'y a pas d'exemples de géomembranes couvertes sur barrage en béton ou en maçonnerie, à l'exception d'un barrage en Chine, pour lequel on n'a pas de détails, et de 5 cas d'application partielle en pied de barrage.

Théoriquement une couche de couverture peut être mise en place pour fournir du poids additionnel au barrage, ou si l'on craint des actes de vandalisme. La couche de couverture est ancrée au barrage par barres en acier pénétrant par la géomembrane. Les pénétrations doivent être étanches.

5.3. CONTRAINTES

Les cas de charge du dispositif d'étanchéité par géomembranes sur le parement amont d'un barrage en béton ou en maçonnerie doivent être étudiés comme indiqué au Chapitre 3. Une charge spécifique, en cas de parement constitué de pierres maçonnées, est la contrainte de poinçonnement élevée causée par la maçonnerie irrégulière.

5.4. DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANES CONCEPTS GÉNÉRAUX

5.4.1. Introduction

Le dispositif d'étanchéité par géomembrane est en général constitué des composants suivants :

- Une couche d'étanchéité, constituée de lés préfabriqués de géomembrane, soudés les uns aux autres sur le parement du barrage pour former une membrane d'étanchéité continue.
- Une couche anti-poinçonnement située sous la géomembrane, en général constitué d'un géotextile non tissé aiguilleté ; la plupart du temps, le géotextile et la géomembrane sont soudés ensemble en usine pour former un géocomposite ; la fonction principale du géotextile est la protection de la géomembrane contre le poinçonnement, et l'augmentation de la résistance de cette dernière.
- Une couche de drainage et de ventilation, à la pression atmosphérique, formée d'un matériau synthétique hautement perméable, de type géofilet ou géotextile, et d'un réseau de conduites.

5.4.2. Géomembrane

La géomembrane doit remplir les conditions générales suivantes :

- Résister aux charges physico-mécaniques sans contraintes excessives et perte d'étanchéité ;
- Résister au rayonnement UV pendant toute la durée de vie ; des essais de vieillissement accélérés peuvent fournir des indications d'altération des principales caractéristiques physico-mécaniques sous rayonnement d'au moins 4500 MJ/m² ;
- Résister aux attaques chimiques et micro-biologiques ;
- Résister aux composants chimiques du ciment qui sont solubles dans l'eau ;

- Être compatible avec d'autres éléments synthétiques du dispositif d'étanchéité (géotextile, géofilet, waterstop, résine de support) ;
- Ne pas présenter de dangers pour l'être humain ;
- Résister au poinçonnement. Des essais d'impact consistant à lâcher une masse normalisée de 0,5 kg d'une hauteur connue (750 mm et plus) donnent des indications sur cette propriété ;
- Ne pas présenter de réduction de l'étanchéité sous allongement multi-axial sur une surface irrégulière semblable à celle sur laquelle le DEG sera installé, avec une pression hydrostatique de 1,3 fois celle du réservoir à son niveau maximum ;
- Ne pas présenter d'altération des caractéristiques physico-mécaniques pendant la durée de vie économique ;
- Ne pas devenir cassable à des températures pouvant atteindre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si les températures devaient descendre sous cette valeur en exploitation, il faudrait en tenir compte pour les spécifications.

En théorie, une géomembrane d'une épaisseur de 1,00 mm peut facilement résister à des pressions hydrostatiques supérieures à 1 000 m, à condition bien sûr qu'elle ne soit pas percée. L'épaisseur de la géomembrane doit toujours être considérée suivant le degré d'irrégularité du support (voir Paragraphe 5.4.3) et la présence d'une couche anti-poinçonnement (voir Paragraphe 5.4.4.).



Fig. 75

Alpe Gera, Italie 1993, hauteur 174 m. Un géocomposite de PVC d'épaisseur de 2 mm assure l'étanchéité d'un blindage détérioré de 3 mm

Le type de géomembrane le plus utilisé dans les systèmes exposés sur les barrages en béton ou en maçonnerie est le PVC (41 cas sur un total de 42 barrages). Aucune géomembrane bitumineuse ou PEHD n'a été utilisée pour des dispositifs exposés.

En l'absence de spécifications particulières, et sur la base de l'expérience, nous suggérons les valeurs minimales suivantes par défaut pour une bonne sécurité lors de l'utilisation de géocomposites PVC sur des barrages de finition régulière : pour une hauteur de barrage $< 40\text{ m}$, une géomembrane de PVC-P 2 mm + GTX 200 g/m², pour un barrage de hauteur $> 40\text{ m}$, une géomembrane PVC-P 2,5 mm + GTX 500 g/m².

Tableau 30
Valeurs suggérées pour des géocomposites PVC-P

Caractéristiques	Unité	Méthode d'essai	2,0 mm + 200 g/m ²	2,5 mm + 500 g/m ²
Épaisseur (géomembrane uniquement)	mm	EN 1849 - 2	2,0 ± 5%	2,5 ± 5%
Résistance à la traction de la géomembrane	KN/m	EN ISO 527 - 4	≥ 20	≥ 28
Déformation à la rupture de la géomembrane	%		≥ 230	≥ 230
Résistance à la traction du géotextile	KN/m		≥ 20	≥ 30
Déformation du géotextile au pic	%		≥ 50	≥ 50
Masse surfacique du géotextile	kg/m ²	EN ISO 9864	200 ± 10 %	500 ± 10 %
Résistance à la déchirure	N	ISO 34 - 1 meth. B sans coupure Fig. 2 - Vitesse 50 mm/min	≥ 300	≥ 500
Résistance au poinçonnement	mm	EN 12691	≥ 1000	≥ 1700
Fragilité à basse température	°C	EN 495 - 5	Pas de rupture à - 30 °C	Pas de rupture à - 30 °C
Résistance à la pression hydrostatique	bar	EN 1928 meth. B	≥ 10	≥ 10
Stabilité dimensionnelle	%	EN 1107 - 2	≤ 2,5	≤ 2,5
Vieillessement thermique dans l'eau : variation maximale du poids après 56 jours à 50 °C et séchage pour 24 h à 80 °C.	%	EN 14415	≤ 2,0	≤ 2,0
Résistance au rayonnement UV : 3 000 heures (350 MJ/m ²)	-	EN 12224	Pas de fissuration	Pas de fissuration

Les valeurs indiquées ne sont pas suffisantes pour caractériser un bon produit. Le succès d'applications antérieures est également très important.

5.4.3. Couche support

Dans les barrages en béton, la géomembrane et les dimensions du dispositif d'ancrage sont étudiés en général pour permettre à un système exposé de se maintenir lui même sur un support en béton stable. La couche support de la géomembrane, béton ou maçonnerie, doit être stable, sans angles ou protubérances, compatibles avec les caractéristiques en traction de la géomembrane.

Il peut être nécessaire de :

- supprimer les revêtements existants instables, de type gunite ou dalles béton écaillées, ou maçonnerie. Dans les cas extrêmes, l'élimination de tout le revêtement béton ancien peut s'imposer (par exemple sur les barrages de

Camposecco et Lago Nero, toute la couche de béton projeté a dû être éliminée).

- mettre en place un autre parement en support (par exemple sur le barrage de Ceresole, une nouvelle surface de béton projetée à été mise en place pour stabiliser et renforcer la maçonnerie, avant protection par une géomembrane PVC exposée).
- meuler les pierres trop saillantes si la surface existante est trop irrégulière, combler les irrégularités par des couches de mortier bien liées, ou de placer un géosynthétique anti-poinçonnement de type géotextile épais (1 500 à 2 000 g/m² comme sur les exemples suivants : Camposecco, Illsee, Chartrain, La Rive, Beli Iskar, Kadamparai).

On prendra soin d'éviter toute irrégularité ou concavité excessive, car elles pourraient provoquer une contrainte excessive localisée sur la géomembrane.



Fig. 76 et 77

Le parement de maçonnerie irrégulière de Camposecco, Italie 1993, a imposé l'installation d'un géotextile anti-poinçonnement épais sous le géocomposite PVC

Pour la réhabilitation des barrages en béton ou maçonnerie existants, il faut étudier la profondeur de la détérioration sur le parement amont. Il peut être endommagé à tel point que des ancrages profonds soient nécessaires. Le système d'ancrage doit éviter les fissures. Si la surface support présente des joints ouverts ou actifs, des fissures, une couche support supplémentaire peut être nécessaire pour éviter la pénétration de la géomembrane dans le joint ou la fissure. Une géomembrane, un géotextile ou un géofilet se sont révélés efficaces lorsqu'ils sont placés entre la géomembrane et le support.

5.4.4. Couche anti-poinçonnement

La couche anti-poinçonnement située derrière la géomembrane d'étanchéité est composée généralement d'un géotextile.

Pour remplir sa fonction de protection pour la géomembrane, le géotextile sous-jacent doit être compatible avec la rugosité réelle de la surface support et la charge hydrostatique.

Un géotextile de masse ≥ 450 g/m² et de résistance au poinçonnement > 4 kN semble le minimum acceptable. Une fois sous pression, les géotextiles plus épais fournissent une protection plus efficace contre le poinçonnement.

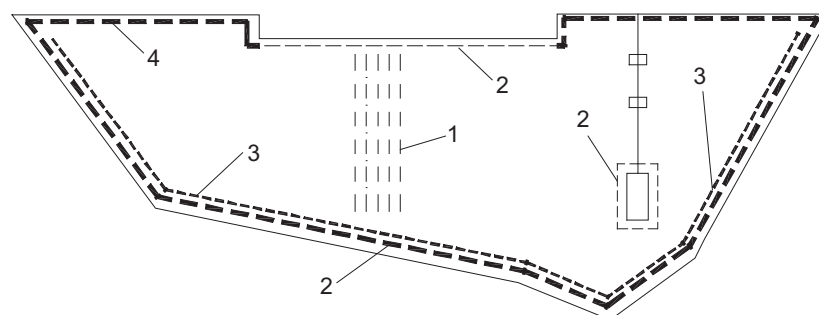
Les meilleures performances en terme de distribution de contrainte sur des zones irrégulières, de caractéristiques d'amortissement, d'absence de plis et

d'ondulations et de résistance sont obtenues lorsque le géotextile est pré-assemblé par un procédé thermique en usine sur la géomembrane pour former un géocomposite. Le géotextile sera un matériau synthétique polymérique non-tissé, aux fibres aiguilletées. Les fibres polyester et polypropylène fournissent de meilleures performances. Si le géotextile est amené à entrer en contact avec un béton frais, on préférera une composition polypropylène pour éviter les attaques alcalines.

5.4.5. Ancrage

Un ancrage mécanique sur le parement est mis en œuvre pour fixer un dispositif d'étanchéité par géomembrane sur des barrages en béton ou maçonnerie pour la réhabilitation, et doit être capable de transférer les charges de la géomembrane au support.

Ancrage linéaire : Il s'agit de la méthode la plus courante pour la réhabilitation de barrages en béton et en maçonnerie avec des DEG exposés. Un dispositif d'ancrage linéaire est installé, de préférence verticalement, sur le parement du barrage. L'espacement entre les lignes d'ancrage verticales, et le type d'ancrage doivent être étudiés de telle sorte que la géomembrane soit lisse et tendue entre les lignes, pour éviter les plis et ondulations qui sont néfastes à la durée de vie de la géomembrane : les plis et ondulations peuvent créer des chemins d'infiltration d'eau préférentiels en cas de dommage accidentel, et la géomembrane peut être pincée ou subir des contraintes trop élevées. Une géomembrane tendue est également plus agréable sur le plan esthétique. L'espacement des lignes verticales, le type et la résistance des ancrages sont déterminés en fonction des charges appliquées et des caractéristiques de la géomembrane, principalement son module d'élasticité. Un module d'élasticité plus élevé (géomembrane plus rigide) augmente les forces sur les ancrages. La charge la plus courante est celle exercée par le vent, qui provoque un soulèvement.



1. Ancrage linéaire vertical sur le parement amont
2. Ancrage périphérique immergé étanche
3. Collecte de l'eau de drainage
4. Joint périphérique NON immergé étanche

Fig. 78

Schéma courant pour les géomembranes sur les barrages en béton

L'ancrage linéaire permet une répartition efficace des forces depuis la surface (la géomembrane exposée) vers une ligne (la ligne d'ancrage) et vers chaque point (les ancrages).

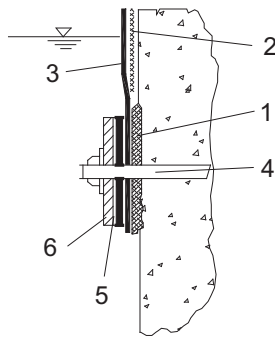
Si la surface de support est en cours de construction, les lignes d'ancrage peuvent être intégrées dans le nouveau parement (Cignana).

Ancrage sur des points : non recommandé. Les forces sont transférées directement de la surface (la géomembrane) vers un point (l'ancrage) par l'intermédiaire du contact entre la circonférence du trou de la géomembrane traversée par l'ancrage, et l'ancrage lui-même, provoquant des contraintes sur la géomembrane pouvant excéder sa résistance limite. Pour réduire les contraintes, les charges appliquées doivent être réduites, ce qui concrètement signifie augmenter le nombre de points d'ancrage, et donc ajouter des perforations à la géomembrane. Il est clair que les perforations dans la géomembrane doivent être évitées dans toute la mesure du possible.

Ancrage sur l'ensemble du parement : le dispositif d'étanchéité par géomembrane peut être ancré sur la surface du barrage en collant la géomembrane avec un matériau synthétique compatible. En pratique, le collage n'est envisageable que pour la réhabilitation de barrages en béton, et non de barrages en maçonnerie. Ce que nous avons présenté au Paragraphe 4.3.6.4 pour le collage sur les barrages en enrochement à masque béton s'applique également aux barrages en béton, et le collage sur l'ensemble de la surface n'est pas recommandé. Le collage le long de lignes n'est pas courant, et une seule petite application a été enregistrée (Zolezzi).

Ancrage mécanique en périphérie (joint périphérique) : l'étanchéification de la géomembrane sur son pourtour est essentiel, et reste indépendant du type de fixation sur le parement. Le joint périphérique est la partie la plus critique de l'installation car il est soumis à un gradient hydraulique élevé, avec la charge hydraulique totale du réservoir d'un côté, et un système de drainage du parement à écoulement libre de l'autre côté. A moins d'un collage de la géomembrane, l'ancrage mécanique doit être de type serrage en compression : la géomembrane est pressée avec un joint plat néoprène ou caoutchouc entre le support et un plat de fixation en acier inoxydable (un profilé acier plat, ou en forme de C ou de U), qui est ancré dans la structure en béton, à l'aide d'ancrages courts lorsque la couche support est résistante et stable (béton ou maçonnerie), et d'ancrages longs s'enfonçant dans le corps du barrage si le parement a été détérioré. Le type et l'espacement des ancrages doivent être confirmés par des essais d'arrachement sur le parement existant. Les ancrages peuvent être de type à expansion mécanique, ou de type chimique (résine époxy extrudée ou en ampoules, et barres d'ancrages). Le meilleur choix pour les performances à long terme entre les ancrages chimiques ou mécaniques est encore discuté. Les ancrages chimiques ont été utilisés avec succès dans le monde entier, tandis que les ancrages mécaniques sont préférés en France. Tous les éléments (plats de fixation, ancrages, boulons, rondelles etc.) doivent être en acier inoxydable, en général AISI 304 et 316. Les dimensions des plats de fixation et l'espacement et la taille des ancrages sont spécifiques au site, et doivent fournir une compression suffisante de la géomembrane contre la couche support, en évitant la création de poches propices aux déchirures par lesquelles l'eau pourrait s'infiltrer.

Les joints périphériques sous le niveau de l'eau sont soumis à la charge hydrostatique la plus forte. En général, les joints périphériques sont composé de plats de fixation de 60 x 6 mm ou 80 x 8 mm suivant que la charge hydrostatique dépasse ou non 50 m. Les ancrages sont en général espacés de 150 mm, avec un diamètre de 12 mm et une profondeur supérieure à 100 mm.

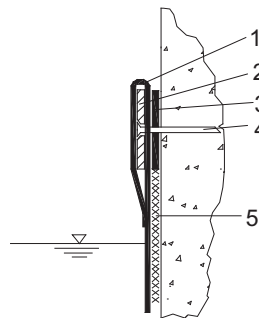


- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. Couche de régularisation | 4. Ancrage |
| 2. Géofilet de drainage | 5. Joint en caoutchouc |
| 3. Géomembrane | 6. Plat de fixation en acier inoxydable |

Fig. 79

Joint périphérique étanche sous le niveau de l'eau (immergé)

Les joints périphériques situés au dessus du niveau de l'eau doivent résister à l'infiltration des précipitations, sans avoir besoin d'être étanches sous pression, car ils ne sont jamais submergés, ni imperméables à l'air, pour permettre la ventilation et l'évacuation de la pression de vapeur (voir 5.4.6). Ils sont en général formés de plats de fixation en acier inoxydable, au minimum 30 x 2 mm, et d'ancrages de 8 ou 10 mm avec un espacement de 200 à 300 mm.



- | | |
|--|-------------------------|
| 1. Géomembrane | 4. Ancrage |
| 2. Plats de fixation en acier inoxydable | 5. Géofilet de drainage |
| 3. Joint en caoutchouc | |

Fig. 80

Joint périphérique étanche au dessus du niveau de l'eau (non immergé)

5.4.6. Dispositif de drainage et de ventilation

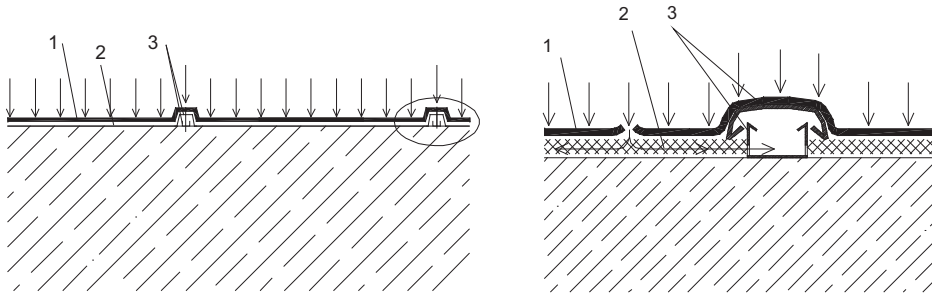
5.4.6.1. Généralités

L'objectif du dispositif de drainage est de :

- Collecter et drainer l'eau pouvant s'infiltrer à travers la géomembrane, et donc éviter que la pression hydrostatique n'agisse contre le parement du barrage, en permettant d'équilibrer la pression des deux côtés de la géomembrane en cas de baisse rapide du réservoir,
- Évacuer derrière la couche d'étanchéité la pression de vapeur provoquée par l'humidité du corps du barrage qui tend à migrer vers la surface présentant une pression inférieure lorsqu'il existe des gradients de température,
- Équilibrer la pression de l'air derrière la couche d'étanchéité, en cas de variation soudaine de la pression atmosphérique, par exemple lorsque le vent souffle,
- Permettre la surveillance de l'étanchéité du DEG.

Le parement pratiquement vertical des barrages en béton et en maçonnerie facilite l'écoulement des fuites éventuelles. L'eau s'écoule par gravité dans l'espace situé entre l'étanchéité et le parement du barrage, et elle est collectée à sa base par un collecteur périphérique, qui évacue l'eau vers une galerie de visite ou directement en aval, ou dans un puisard équipé d'une pompe. L'évacuation de l'eau drainée doit être surveillée.

La présence d'une couche drainante supplémentaire de type géofilet améliore la transmissivité. Les profils d'ancrage qui fixent la géomembrane au parement du barrage peuvent fournir un drainage supplémentaire, comme dans certains systèmes brevetés.



1. Géomembrane
2. Couche drainante continue en parement
3. Profils d'ancrage brevetés formant un conduit de drainage vertical (pour détails, voir 4.6.5)

Fig. 81

L'eau d'infiltration recueillie par la couche drainante en parement, et par les conduits de drainage verticaux, est amenée au dispositif de collecte et d'évacuation en pied

Les matériaux conseillés pour le drainage du parement sont les matériaux synthétiques présentant de très nombreux espaces, comme les géotextiles et les géofilet. Les géofilet ont une transmissivité supérieure et une compressibilité inférieure à celles des géotextiles. Les nervures du géofilet forment des chemins de circulation préférentiels pour l'eau drainée et l'air de ventilation. Pour les réservoirs en eau, la pression hydrostatique modifie légèrement la géométrie du géofilet, et donc sa transmissivité, mais les capacités de drainage et de ventilation ne changent que très peu. La résistance des nervures d'un géofilet doit être vérifiée lorsqu'on prévoit de l'installer sur une surface agressive pouvant les briser et donc réduire la transmissivité.

L'eau collectée par le dispositif de drainage en parement s'écoule par gravité vers un collecteur placé en limite inférieure de géomembrane. La collecte en pied s'effectue généralement par une conduite périphérique, tuyau perforé, positionné en pied du parement amont du barrage. Ce collecteur peut être noyé dans le parement du barrage (Chambon, France), positionné à l'extérieur du parement (Illsee, Suisse, Pracana, Portugal) ou noyé dans une nouvelle plinthe béton (Camposecco, Italie). Le collecteur en pied dans la plinthe béton peut être de type drain rectangulaire, c'est-à-dire tuyaux perforés noyés dans une tranchée remplie de matériau drainant, ou, au lieu d'un tuyau, une bande supplémentaire de géofilet à haute transmissivité installé le long du joint périphérique submergé (Fully, Suisse). Voir Fig. 82.

5.4.6.2. Conception du dispositif de drainage

Les concepts de drainage présentés au chapitre 4 sur les barrages en remblai s'appliquent également aux barrages en béton. La couche support de béton ou de

maçonnerie n'assure pas en général un drainage adéquat, et la plupart du temps, une couche drainante géosynthétique est placée entre le support et la géomembrane.

Les études pour le dispositif de drainage doivent évaluer sa capacité à collecter et évacuer un volume d'eau prédéterminé. Tous les éléments du dispositif doivent présenter une capacité de drainage équilibrée.

	<ol style="list-style-type: none"> 1. Géomembrane 2. Couche drainante 3. Tuyau de collecte noyé dans la plinthe béton 4. Tuyau d'évacuation 5. Géomembrane d'étanchéité derrière la plinthe 6. Plinthe 7. Béton poreux 8. Joint étanche 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Géomembrane 2. Couche drainante 3. Tuyau de collecte 4. Tuyau d'évacuation 5. Géomembrane d'étanchéité derrière la plinthe 6. Plinthe 7. Nouveau béton poreux 8. Joint d'étanchéité
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Géomembrane 2. Couche drainante 3. Profilé de collecte 4. Tuyau d'évacuation 5. Plaque de recouvrement 6. Joint étanche 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Géomembrane 2. Couche drainante 3. Drain rectangulaire 4. Tuyau d'évacuation 5. Injection 6. Nouveau béton 7. Joint étanche
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Géomembrane 2. Couche drainante 3. Tuyau de collecte 4. Tuyau d'évacuation 5. Béton existant 6. Béton poreux 7. Joint étanche 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Géomembrane 2. Couche drainante 3. Tuyau de collecte pour parement amont 4. Evacuation de drainage pour le parement amont 5. Evacuation de drainage pour la fondation 6. Tuyau de collecte pour la fondation 7. Béton poreux 8. Béton imperméable 9. Joint étanche 10. Waterstop et géocomposite

Fig. 82
Configurations des collecteurs drainants

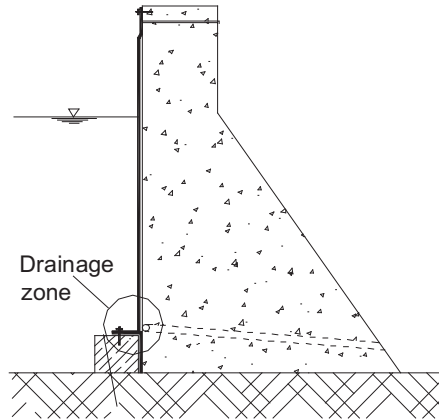


Fig. 82 (suite)
Configurations des collecteurs drainants

L'étude du dispositif de drainage doit prévoir une collecte de l'eau derrière la géomembrane pour deux raisons principales : un défaut ou un dommage à la géomembrane, ou le contournement du joint périphérique par l'eau, ce peut être de l'eau en provenance du réservoir (généralement sous pression hydrostatique élevée) et/ou depuis la crête (joint supérieur). Une décision importante concerne l'écoulement que le dispositif drainant est susceptible d'évacuer. Deux grandes catégories peuvent être envisagées :

a) le dispositif drainant est destiné à évacuer de faibles débits, et à jouer le rôle d'un simple système de surveillance de l'efficacité de la géomembrane. Tout débit trop élevé au point d'évacuation doit déclencher une recherche du point d'infiltration, défaut de la géomembrane ou fuite sur le joint périphérique. Une fois la source identifiée, il faudra décider s'il est judicieux de réparer et quelle sera la méthode adoptée. En cas de débit d'infiltration élevé, le dispositif drainant peut ne pas être capable d'évacuer rapidement l'eau, qui s'accumulera dans la couche drainante derrière la géomembrane, et appliquer une pression hydrostatique sur le parement. Si cette solution est adoptée, le barrage doit être capable de résister à cette pression. C'est le cas lorsque la géomembrane est installée comme mesure préventive pour éviter une détérioration supplémentaire du parement, cas le plus souvent mentionné, et qu'une pression temporaire ne pose en général pas de problème.

b) Le système drainant est conçu pour éviter toute pression hydrostatique contre le parement amont. C'est le cas des barrages présentant de grandes fissures, des joints de jeu ouverts, sujets à une alcali-réaction ou situés dans des régions sismiques. Le débit pouvant être évacué doit être du même ordre de grandeur que le volume susceptible de s'infiltrer dans le dispositif. Concrètement, aucune augmentation de pression, même temporaire, n'est acceptée dans la couche drainante. Les études doivent identifier les sources potentielles d'infiltration.

b1) Infiltration due aux défauts de la géomembrane. L'expérience actuelle, comme l'indique les données de la base, montre qu'un défaut de la géomembrane est extrêmement rare. La quantité d'eau pouvant s'infiltrer dépend de la taille du défaut et de la charge hydrostatique correspondante dans le réservoir. Sauf effondrement soudain de la couche support à une

profondeur importante, le défaut se trouve le plus souvent localisé près de la surface du réservoir. La réparation s'effectue facilement, à sec ou éventuellement sous l'eau.

b2) Infiltration due à un contournement des joints périphériques de la géomembrane. Si la recherche indique que la source d'infiltration se trouve au niveau du joint périphérique, l'eau contournant ce dernier par des fissures non traitées, des joints, des waterstops etc., la réparation peut s'avérer plus compliquée et plus longue, et mettre en jeu des mesures de type injections.

Le projeteur doit évaluer les débits à collecter et évacuer. Un dispositif de drainage très efficace à grand débit ajoutera des coûts au projet, qui ne seront pas justifiés si tous les autres aspects de type résistance du support, traitement des points d'infiltration potentiels à l'intersection avec le joint périphérique, et injections de contact adéquates de la plinthe périphérique ont été traités correctement. Un dispositif drainant à haut débit améliore la sécurité du dispositif d'étanchéité par géomembrane, car il évite une montée rapide en pression pouvant faire éclater la géomembrane en cas de baisse rapide du niveau du réservoir. D'un autre côté, ce dispositif est susceptible d'évacuer un volume d'eau important dans la galerie de visite. Une telle situation laissant supposer des pertes dans le corps du barrage peut n'être pas acceptée. Le système de drainage est destiné avant tout à contrôler la performance de la géomembrane : des venues d'eau importantes peuvent laisser croire à un défaut de la géomembrane, alors que ces eaux ont bien d'autres origines possibles. Par exemple, elles peuvent avoir pour origine des fissures ou un contournement de la plinthe périmétrale, ou la fondation ou encore la crête. Ainsi, on peut imaginer un corps de barrage parfaitement sec et un débit conséquent au point de collecte des eaux drainées. Si des travaux complémentaires sont effectués afin de réduire les eaux d'infiltration (traitement particulier de la plinthe aux points singuliers et en sous face), il semble peu judicieux de dépenser aussi des sommes importantes pour un système drainant de haute capacité. En principe, un complexe équipé d'un géo-filet de drainage de forte transmissivité est alors suffisant.

Le principe fondamental de tous les dispositifs de géomembrane drainés consistant à intercepter toute fuite par le dispositif drainant en parement et à l'évacuer avant que cette eau ne provoque une pression sur le parement amont et s'infilte dans le barrage, doit être considéré comme une caractéristique positive et non un défaut.

La présence d'un débit d'évacuation en sortie du drainage d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane ne prouve pas que le défaut concerne uniquement la géomembrane. La surveillance du débit d'évacuation ne suffit pas à suivre le comportement du DEG ou du barrage, car l'infiltration peut se produire à travers la géomembrane, par contournement du joint périphérique ou à travers la fondation. L'interprétation des données doit s'effectuer en conjonction avec les autres moyens d'auscultation classique de type piézomètre etc. Une surveillance plus efficace du dispositif de géomembrane s'effectue par un système dédié, de type câbles à fibres optiques, systèmes géo-électriques de détection de fuites, doubles géomembrane, etc., comme indiqué au Chapitre 8.

L'importance des relevés du dispositif de drainage est également évoquée au Chapitre 9, critères d'acceptation.

Dans certains cas, pour faciliter la localisation des fuites et la surveillance du dispositif d'étanchéité, la surface de la géomembrane est divisée en zones plus restreintes, que l'on appelle compartiments. Ces compartiments sont définis par des profilés de fixation supplémentaires, qui maintiennent l'écoulement d'eau drainée dans des zones confinées, chacune équipée d'un système dédié de collecte, évacuation et ventilation. Cette solution est plus onéreuse, et il faut d'abord évaluer si un simple dispositif drainant associé à d'autres systèmes de surveillance de la géomembrane serait suffisant. L'avantage de la compartimentation réside dans l'amélioration de sécurité du système. Sur le barrage à contreforts de Pracana, affecté par alcali-réaction, la surface de 10 000 m² a été ainsi divisée en 9 compartiments indépendants.

5.4.6.3. Construction

L'eau drainée peut être collectée soit dans une conduite périphérique, ou en bas de chaque compartiment de drainage par gravité, à travers des trous de drainage allant du collecteur vers une galerie de visite/de drainage (le cas échéant, soit dans le corps du barrage, soit au pied amont), à travers le corps du barrage, ou directement vers le parement aval du barrage. La collecte et l'évacuation peuvent également s'effectuer vers l'amont, en pompant l'eau à partir d'un puisard vers un point d'évacuation (pouvant se trouver en crête) par l'intermédiaire d'une conduite dédiée installée sur le parement amont.

Un géofilet consiste en rubans polymères qui se croisent et sont soudés les uns aux autres pour former un filet stable avec de grandes ouvertures et une bonne transmissivité. La composition du matériau brut doit être telle que pendant une durée de vie de 40 années au minimum, les caractéristiques physico-mécaniques ne soient pas trop altérées, notamment en ce qui concerne la transmissivité.

Un géofilet présentera en général les caractéristiques principales suivantes :

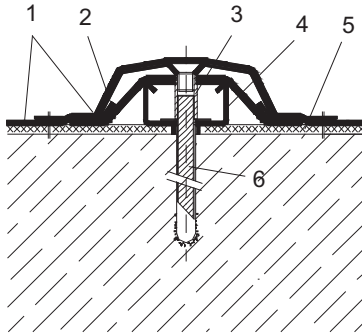
- Masse surfacique $\geq 1000 \text{ g/m}^2$
- Épaisseur $\geq 7 \text{ mm}$
- Force de traction $> 10 \text{ kN/m}$
- Transmissivité $\geq 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

5.4.7. Géomembranes exposées et dispositifs d'ancrage

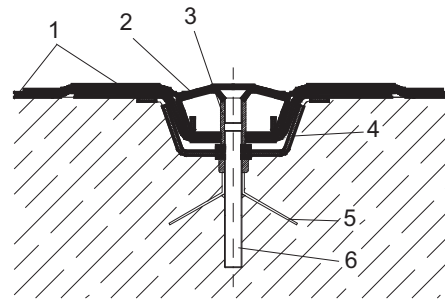
Il existe 42 barrages équipés d'un dispositif d'étanchéité par géomembranes exposées.

La plupart d'entre eux utilisent des lignes d'ancrage continues pour permettre une répartition uniforme des contraintes.

Un système très employé, qui s'est révélé efficace et a déjà été mentionné dans le Bulletin 78 (1991), consiste en des paires de profilés en acier inoxydables installés parallèlement et verticalement sur le parement du barrage. Ce système est breveté.



1. Géocomposite PVC et bande de géomembrane PVC
2. Profilé de tensionnement
3. Élément de raccordement
4. Profilé inférieur
5. Géofilet de drainage (optionnel)
6. Ancrage



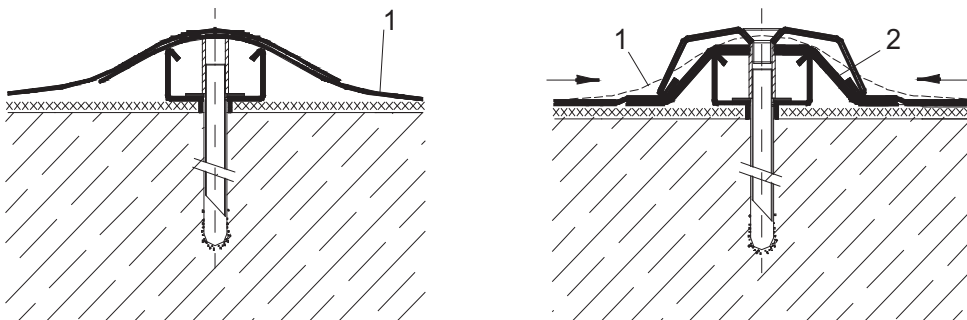
1. Géocomposite PVC et bande de géomembrane PVC
2. Profilé de tensionnement
3. Élément de raccordement
4. Profilé noyé
5. Ailettes d'ancrage
6. Ancrage

Fig. 83 et 84

Le dispositif de tensionnement breveté existe en deux configurations : avec les deux profilés externes en parement (à gauche), et avec un profilé encastré dans la couche support (à droite)

Les profilés inférieurs sont fixés par l'intermédiaire d'ancrages chimiques forés dans le parement amont du barrage. Des rouleaux de géocomposite sont déroulés depuis la crête du barrage en se chevauchant légèrement, puis soudés pour correspondre aux profilés inférieurs. Les profilés supérieurs, par l'intermédiaire d'éléments de connexion en acier inoxydable, enfoncent le géocomposite dans le profilé inférieur en mettant en prétension le matériau de la géomembrane.

La forme des deux profilés et l'effet de serrage permettent une fixation linéaire uniforme du géocomposite. Le prétensionnement minimise l'affaissement entraîné par le poids du géocomposite.



1. Configuration du géocomposite PVC avant la mise en tension
2. Configuration prise par le géocomposite après serrage du profilé supérieur

Fig. 85

Effet de prétensionnement des deux profilés (breveté)

Les deux profilés créent également un canal vertical pour un drainage à écoulement libre, qui collecte l'eau derrière le géocomposite et l'amène au pied du parement pour évacuation. Des bandes de géomembrane sont soudées sur les profilés verticaux pour étanchéifier les trous nécessaires à l'installation des éléments de fixation en acier. L'un des avantages principaux du système de fixation décrit est sa capacité à fournir, en association avec le géotextile et/ou le géofilet, une aptitude au drainage efficace en surface juste derrière la géomembrane.

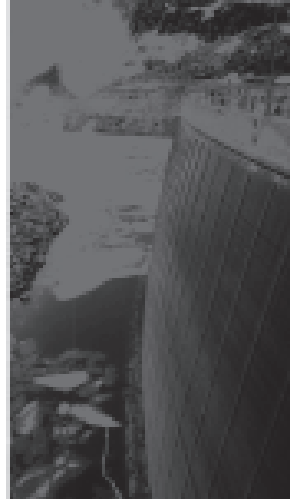
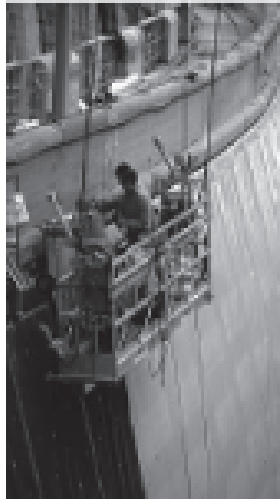
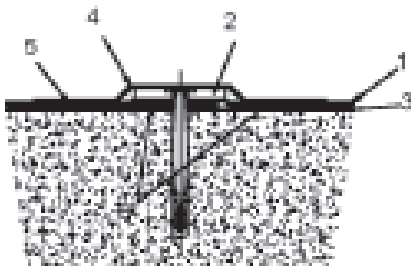


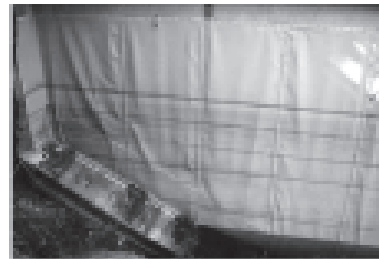
Fig. 86 et 87

Visualisation de l'effet de pré-tensionnement à Publino, Italie : avant (à gauche) et après (à droite) l'installation des profilés de tensionnement

D'autres dispositifs d'ancrage peuvent également être utilisés. Sur le barrage de l'Echapre, en France, les lignes d'ancrage sont constituées de plats de fixation qui ne permettent pas la mise en tension.



- 1. Géocomposite PVC
- 2. Plat de fixation
- 3. Géofilet



- 4. Géomembrane PVC
- 5. Soudure sur site
- 6. Soudure de préfabrication

Fig. 88 et 89

Dispositif d'ancrage plat à l'Echapre, France. Après 10 ans d'utilisation, les plis observés n'ont pas eu de conséquences



Fig. 90 et 91

Ancrage avec profilés de tensionnement (Girotte, France 1997, à gauche) fournissant une bonne adhérence du géocomposite sans plis ni affaissement, et à droite avec de simples plats de fixation (Echapre, France 1997) qui provoquent la formation d'ondulations ou de plis.

Lorsque la géomembrane est percée, ces plis forment des canaux préférentiels permettant à l'eau de s'infiltrer. De plus, les plis sont exposés différemment au rayonnement UV et permettent l'adhérence de la glace, ce qui provoque des contraintes non contrôlées

Sur la crête du barrage, le géocomposite est fixé par un plat de fixation horizontal de résistance variable suivant les conditions. Un joint supérieur qui ne devra résister qu'à une faible charge hydraulique de type précipitations ou vagues éventuelles, sera différent d'un joint soumis à des déversements importants, par exemple sur l'évacuateur.

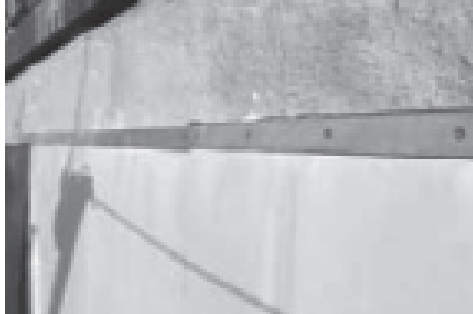


Fig. 92 et 93

Joint périphérique supérieur au dessus du niveau de l'eau (Publino, Italie 1989, à gauche) et joint supérieur étanche (évacuateur Lago Miller, Italie 1976, à droite).

On tiendra compte des contraintes subies par la géomembrane sur l'évacuateur et les surfaces horizontales, et de la résistance de celle-ci aux objets flottants pendant les crues

Sauf si la section de parement couverte n'est haute que de quelques mètres, il ne faut jamais ancrer le géocomposite ou la géomembrane uniquement en crête, car les contraintes provoquées par le poids ne sont pas acceptables à long terme.

L'ancrage à la périphérie latérale du barrage et en pied est étudié pour maintenir la couche étanche en place et pour éviter le contournement par l'eau. L'ancrage doit être adapté à la charge hydrostatique. Il peut s'effectuer sur le parement du barrage ou sur une poutrelle béton en périphérie.

L'ancrage est constitué de plats de fixation en acier inoxydable qui compriment et fixent la géomembrane. L'efficacité de l'étanchéité dépend de la régularité et de l'ampleur de cette compression. Pour obtenir une compression régulière sur toute la longueur de l'ancrage, le plat doit être étudié pour être à la fois flexible, ce qui assure un contact permanent avec la surface sous-jacente, et rigide pour pouvoir assurer l'étanchéité. Des bandes flexibles de caoutchouc sur une ou deux faces de la géomembrane et sur le parement du barrage, des plaques de raccord sur le profil des plats de fixation adjacentes et une surface plane sont indispensables pour répartir la

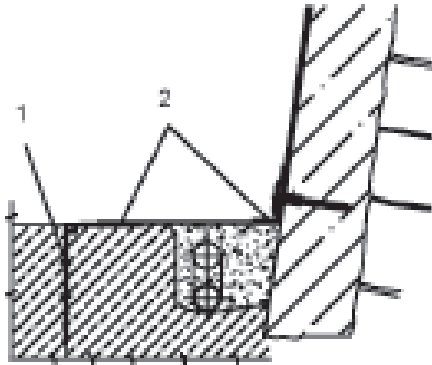


Fig. 94 et 95

Joints périphériques inférieurs (Scais, Italie 1993, et Pian Sapejo, Italie 1990)

compression. Le système d'ancrage doit assurer une compression constante pendant la durée de vie du dispositif d'étanchéité. Des ancrages chimiques à deux composants sont utilisés en général pour fixer les plats de fixation dans le barrage, mais il est également possible d'employer des ancrages mécaniques. Le géotextile est supprimé du géocomposite à l'endroit des joints étanches, pour éviter l'infiltration d'eau par capillarité.

Une autre option technique consiste à souder la géomembrane sur un waterstop synthétique noyé dans le béton du barrage, dans le cas d'une nouvelle construction, ou sur une poutrelle montée en pied en cas de réhabilitation.



1. Waterstop
2. Géomembrane soudée au waterstop et au revêtement géomembrane du parement amont.

Fig. 96 et 97

Joint périphérique en pied obtenu par soudage de la géomembrane PVC au waterstop (Herbringhauser, Allemagne 2004)

Sur les joints du béton, l'ancrage périphérique doit permettre un raccord étanche entre le dispositif de géomembrane et le waterstop des joints. Les résultats les plus efficaces ont été obtenus grâce à un waterstop serré avec la géomembrane, ou grâce à un waterstop soudé à une bande de géomembrane, elle même raccordée à la géomembrane principale. Une autre option consiste à joindre le waterstop et la géomembrane dans une feuillure remplie d'un matériau étanche expansible et flexible, de type résine époxy. Les résultats ont été variables selon le type de matériau de remplissage.



Fig. 98 et 99

Feuillure remplie de résine époxy (Chartrain, France 1993, à gauche).

Injection des joints pour intercepter les waterstops noyés (Midtbotnvatn, Norvège 2004, à droite)

Une autre option consiste à sceller par injection l'espace dans le joint entre la fixation périphérique de la géomembrane sur le parement amont et les waterstops noyés (Vale do Rossim, Kadamparai, Hohenwarte).

Lorsque les tiges de fixation traversent la géomembrane, l'infiltration d'eau doit être évitée. On peut recouvrir les têtes de mastic, de résine synthétique etc. ou encore appliquer une bande ou rustine du même matériau synthétique que la géomembrane sur le dispositif d'ancrage et la souder à chaud sur cette dernière. Une autre possibilité consiste à rendre cette traversée étanche par combinaison de rondelles, joints et écrous qui compriment la géomembrane comme pour un joint périphérique.

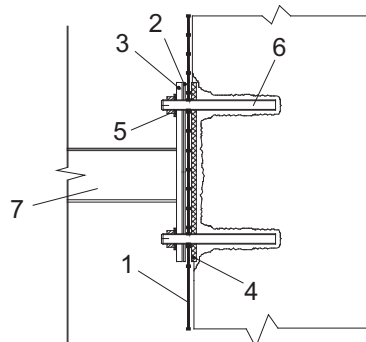


Fig. 100
Traversée étanche

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| 1. Géomembrane | 5. Boulons |
| 2. Joint plat | 6. Ancrages |
| 3. Plaque d'acier | 7. Structure en acier |
| 4. Plaque d'acier | |

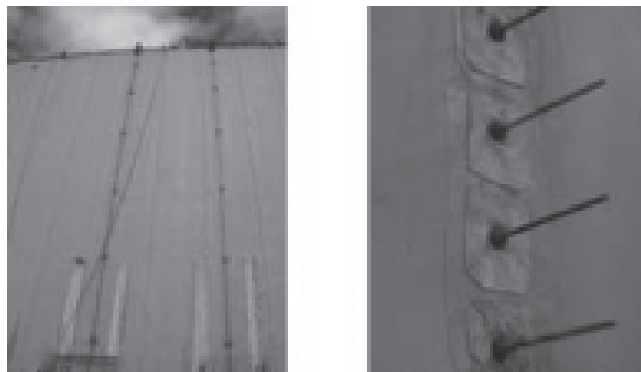


Fig. 101 et 102

Traversées étanches pour le renforcement des nouvelles parois des évacuations (Beli Iskar, Bulgarie 2002)

Tous les dispositifs d'ancrage de type chevilles, boulons, profilés de serrage et vis doivent être en acier inoxydable. Ils doivent résister aux produits chimiques issus du béton du barrage et d'autres ciments, ainsi qu'à ceux se trouvant dans l'eau du réservoir.

Les supports élastiques de type caoutchouc, caoutchouc mousse, néoprène etc. et les waterstops doivent être résistants au contact du système d'ancrage, des géomembranes et du matériau du barrage. Ils doivent présenter une durée de vie similaire aux autres éléments du DEG.

5.4.8. Géomembrane couverte et couche de couverture

La base de données ne présente pas de cas de géomembranes couvertes sur le parement amont des barrages en béton ou en maçonnerie. Il est possible de mettre en place des couvertures de béton légères, ancrées en crête ou par l'intermédiaire de fixations traversants étanches.

5.5. TECHNIQUES D'INSTALLATION

5.5.1. À sec

La technique générale reste globalement similaire pour installer une géomembrane sur un nouveau barrage et sur un barrage existant. Dans les deux cas le dispositif d'étanchéité par géomembranes est installé sur le parement amont du barrage une fois terminé et préparé.

Pour permettre un bon contact entre le parement du barrage et la géomembrane sans bulles, plis ou tension, on conseille généralement d'éviter l'installation du géocomposite en dehors de la plage de température + 5 °C à + 35 °C.

L'installation se déroule depuis la crête du barrage en utilisant des plates-formes descendues par treuil. Très rarement, on met en place un échafaudage couvrant le parement amont. Le joint périphérique est en général mis en place par des ouvriers se déplaçant sur le sol.

La couche drainante par géofilet, et le géocomposite/géomembrane sont installés directement sur le parement amont du barrage. La surface du barrage doit être nettoyée et les particules détachables éliminées. Les zones importantes endommagées ou en nid d'abeille doivent être réparées, et leurs dimensions doivent être prises en compte pour la sélection des géomembranes et des couches supplémentaires de type géotextile ou géofilet. Il faut également évaluer la qualité des joints de construction sur la surface, et tous les types de fissures : dans la plupart de cas il n'ont pas besoin d'être étanchéifiés, car ils sont recouverts par le DEG. En principe, le support du dispositif d'étanchéité n'a pas besoin d'être lisse et régulier, car le géotextile et le géofilet fournissent une couche de protection anti-poinçonnement. Cependant, les protubérances aigues et les angles doivent être éliminés pour éviter la concentration des contraintes, qui peuvent endommager la géomembrane. Les couches de drainage et anti-poinçonnement étant définies pour s'adapter à la rugosité du support et à la pression hydrostatique maximale, il est très important de prédéfinir la rugosité admissible. Les surfaces de référence fournies par le International Institute for Concrete Repair (États-Unis) fournissent un outil pratique.



Fig. 103

Géotextile anti-poinçonnement sur une section en maçonnerie (inférieure) et géofilet de drainage sur section béton (supérieure) sur le barrage d'Illsee, Suisse 1996

Après préparation du parement du barrage, le dispositif d'ancrage est installé verticalement pour fixer la couche d'étanchéité. L'espacement entre les profilés verticaux dépend de la vitesse de vent de projet, de la dimension des rouleaux de

espacement supérieur à 8 m pour prévenir les déplacements, les ondulations, les affaissements ou les plis du géocomposite, et également les difficultés de mise en place en raison de la grande surface et du poids élevé du rouleau de géomembrane qui doit être manipulé par des ouvriers sur des plates formes suspendues. Les trous d'ancrage sont forés dans la surface du barrage, à une profondeur permettant une fixation sûre. L'espacement et la dimension des ancrages dépendent des critères présentés à la Section 4.3.6. Les chevilles d'ancrage en acier inoxydable fileté sont placées en même temps que l'élément inférieur des profilés de serrage. On utilise en général des produits chimiques ou résines époxy à deux composants pour fixer les boulons. Pour lisser la zone sur laquelle le dispositif de serrage est placé, on met en place en général un mortier époxy et des joints plats. Il est possible de créer des compartiments de drainage sur la surface du dispositif d'étanchéité par géomembranes en plaçant des lignes étanches constituées par des plats de fixation et des joints, ou seulement des joints qui doivent résister aux sous-pressions maximales pouvant se développer dans le dispositif drainant derrière la géomembrane.

Un géofilet est mis en place comme couche drainante (additionnelle et optionnelle), fixé par des ancrages frappés dans des trous forés préalablement dans le parement. L'utilisation de clous frappés n'est pas recommandée, car il n'est pas possible de contrôler leur mise en place dans le revêtement, et s'ils dépassent du parement, ils peuvent percer la géomembrane pendant l'exploitation du réservoir. A l'extrémité inférieure du géofilet, un trou de drainage est foré à travers le barrage vers le pied aval ou vers une galerie de drainage pour évacuer l'eau collectée. Une entretoise acier placée devant les trous de drainage permet d'éviter la pénétration de la géomembrane dans le trou sous l'effet de la pression de l'eau et son obturation.

Conformément au plan d'installation pré-établi, les rouleaux de géocomposite/ géomembrane sont fabriqués à la bonne taille en usine ou découpés, de manière à couvrir de préférence toute la hauteur du barrage pour éviter d'avoir à raccorder horizontalement les rouleaux.

Les lés de géocomposite sont descendus depuis la crête, à l'aide de dispositifs spécifiques de déroulement par treuils, de manière à ce que deux lés adjacents se recouvrent sur le dispositif de serrage avec une largeur suffisante. Un ancrage provisoire en crête et le long des profilés de fixation permet de minimiser l'élongation due au poids mort et le soulèvement par le vent. Des points de soudure temporaires, utilisés pour maintenir en position les lés déroulés, permettent d'attendre le soudage définitif qui doit être effectué le plus rapidement possible. Une fois le géocomposite en position exacte, la géomembrane est placée sur le profilé inférieur et fixée et mise sous tension par le profilé supérieur. Ensuite, les lés de géocomposite adjacents sont soudés l'un à l'autre. Le soudage peut s'effectuer par soudure automatique double, ou par soudure manuelle simple suivant la méthode d'installation. Il est important de noter que l'utilisation d'une machine de soudage automatique n'est pas possible près des fixations mécaniques, dont la présence gêne l'insertion de la seconde paire de roulettes sous la géomembrane. Toutes les soudures doivent être effectuées en conditions ambiantes sèches et tempérées (ni précipitations, ni températures trop basses) sauf si l'on peut fournir un abri efficace.

La géomembrane est installée dans la mesure du possible sans aucun joint horizontal depuis la crête du barrage jusqu'à son pied. Pendant la mise en place et l'ancrage du géocomposite sur le parement, il est maintenu en crête sans être fixé définitivement. Ensuite, le géocomposite est fixé sous la crête et en périphérie sur les appuis par un simple dispositif de serrage constitué de plats de fixation. En pied

du barrage, la géomembrane est fixée de manière étanche, soit en bas du parement, soit sur la face supérieure d'une poutrelle béton avec un simple plat de fixation. Une autre option consiste, dans le cas d'une nouvelle construction, à noyer des waterstops ou bandes de géomembranes dans le béton du barrage sur les appuis périphériques et en pied, puis à les souder avec la géomembrane pour fournir une connexion étanche entre le DEG et le parement.



Fig. 104 à 106

L'installation peut être effectuée en une campagne estivale (barrage voûte de Publino, Italie 1989), ou échelonnée sur plusieurs années pour minimiser l'impact sur l'exploitation (barrage à contreforts de Scais, Italie, à partir de 1993, réservoir STEP)

5.5.2. Immergée

Les techniques d'installation décrites plus haut sont théoriquement effectuées en conditions sèches. Toutefois, les restrictions dans l'abaissement du niveau du réservoir pour des travaux de rénovation peuvent exiger une installation sous l'eau. L'installation immergée a été effectuée avec succès pour la réhabilitation du barrage poids à double courbure de Lost Creek (Etats-Unis, 1997). La technique utilisée applique le même concept breveté à base de profilés en acier inoxydables qui fixent et mettent sous tension la géomembrane, comme mentionné dans le chapitre d'installation à sec. En général, le parement du barrage est moins régulier car le lissage est difficile. Une épaisseur supplémentaire de la couche de protection géotextile et du géofilet peuvent compenser cela. Le déroulement des lés de géocomposite est préférable depuis le bas vers le haut. Des câbles sont installés sur le parement du barrage pour permettre aux plongeurs de mettre en place et d'aligner les lés. Un soudage par chauffage n'est pas possible actuellement sous



Fig 107 et 108

Descente d'une nappe PVC pour installation immergée (Lost Creek, Etats-Unis 1997)

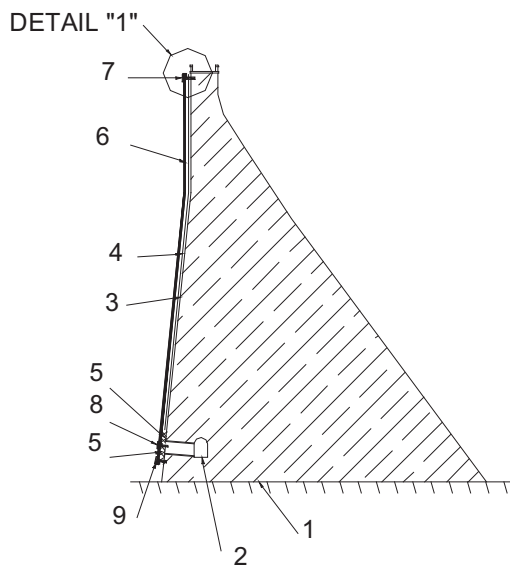
l'eau à des coûts raisonnables, et les nappes sont assemblées par des dispositifs mécaniques brevetés étanches utilisant des profilés en acier inoxydable. Théoriquement, les joints mécaniques doivent coïncider avec le système d'ancrage.

5.6. EXEMPLES TYPIQUES

5.6.1. Réhabilitation d'un barrage en maçonnerie, géomembrane en PVC exposée, installation à sec

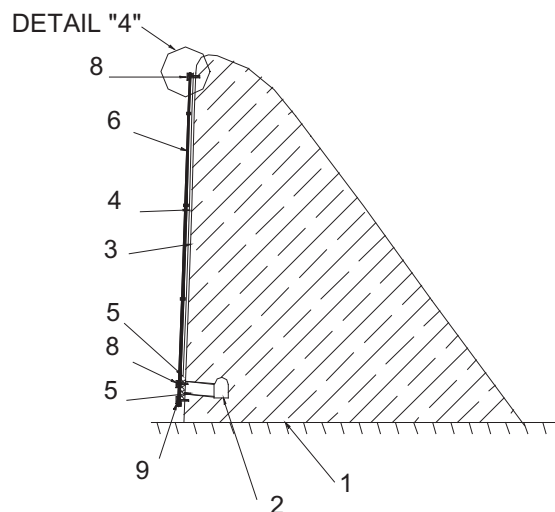
Annexe 1 : barrage de Kadamparai, Inde 2004

Coupe actuelle



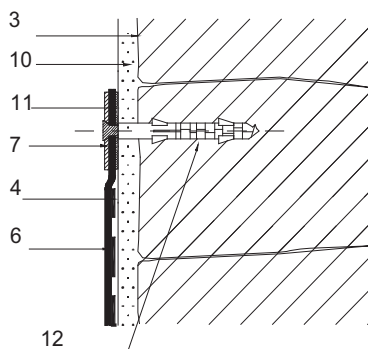
1. Fondation
2. Galerie de drainage
3. Parement amont en maçonnerie
4. Géotextile anti-poinçonnement 2000 g/m²
5. Géofilet de drainage
6. Géocomposite PVC (géomembrane PVC 2,5 mm + geotextile 500 g/m²)
7. Joint supérieur (voir Dét. 1), non immergé
8. Joint périphérique primaire (voir Dét. 5/b)
9. Joint périphérique secondaire (voir Dét. 5/c)

Coupe de l'évacuateur



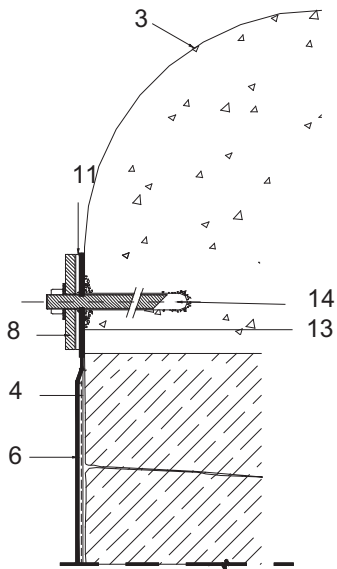
1. Fondation
2. Galerie de drainage
3. Parement amont en maçonnerie
4. Géotextile anti-poinçonnement 2000 g/m²
5. Géofilet de drainage
6. Géocomposite PVC (géomembrane PVC 2,5 mm + geotextile 500 g/m²)
7. Joint supérieur (voir Dét. 4), immergé
8. Joint périphérique primaire (voir Dét. 5/b)
9. Joint périphérique secondaire (voir Dét. 5/c)

DETAIL "1"



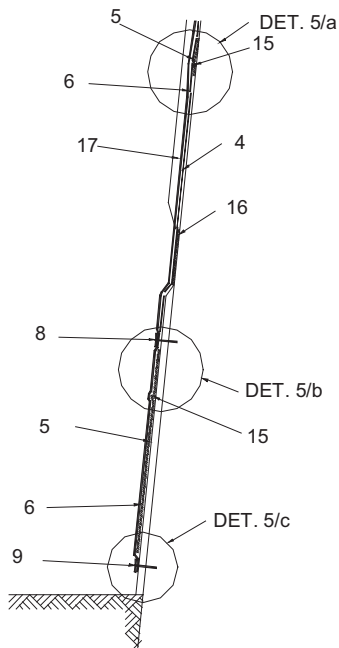
3. Parement amont du barrage
10. Gunite de régularisation
4. Géotextile anti-poinçonnement 2000 g/m²
6. Géocomposite PVC
11. Joint caoutchouc
7. Joint supérieur - Plat de fixation en acier inoxydable
12. Ancrage à expansion

DETAIL "4"



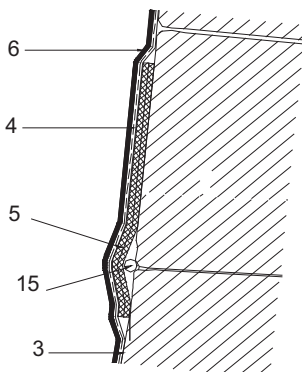
- 3. Parement amont du barrage au déversoir
- 13. Mortier époxyde de lissage
- 4. Géotextile anti-poinçonnement 2000 g/m²
- 6. Géocomposite PVC
- 11. Joint caoutchouc
- 8. Fixation supérieure - Plat de fixation en acier inoxydable
- 14. Ancrage chimique

ANCRAGE EN PIED



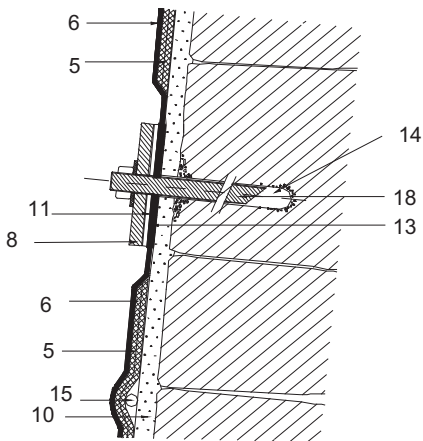
- 15. Cable à fibres optiques
- 5. Géofilet de drainage
- 4. Géotextile anti-poinçonnement 2000 g/m²
- 6. Géocomposite PVC
- 16. Géotextile anti-poinçonnement et géofilet superposés pour transition
- 17. Profilé de tensionnement
- 8. Joint périphérique primaire
- 9. Joint périphérique secondaire

DETAIL "5/a"



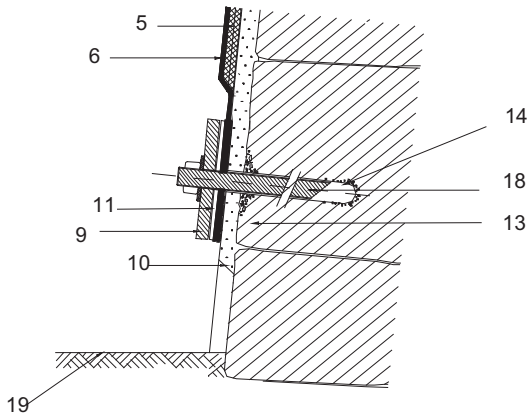
- 3. Parement amont en maçonnerie
- 15. Cable à fibres optiques
- 4. Géotextile anti-poinçonnement 2000 g/m²
- 5. Double couche de géofilet de drainage
- 6. Géocomposite PVC

DETAIL "5/b"



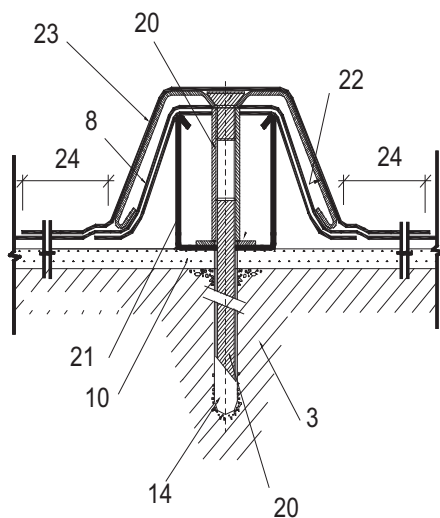
- 10. Gunite de régularisation
- 15. Cable à fibres optiques
- 5. Double couche de géofilet de drainage
- 6. Géocomposite PVC
- 14. Ancrage chimique
- 18. Tige filetée inox
- 13. Mortier epoxide
- 11. Joint caoutchouc
- 8. Joint périphérique primaire - Plat de fixation en acier inoxydable

DETAIL "5/c"



- 19. Terrain naturel
- 10. Gunite de régularisation
- 5. Double couche de géofilet de drainage
- 6. Géocomposite PVC
- 14. Ancrage chimique
- 18. Tige filetée inox
- 13. Mortier epoxide
- 11. Joint caoutchouc
- 9. Joint périphérique secondaire - Plat de fixation en acier inoxydable

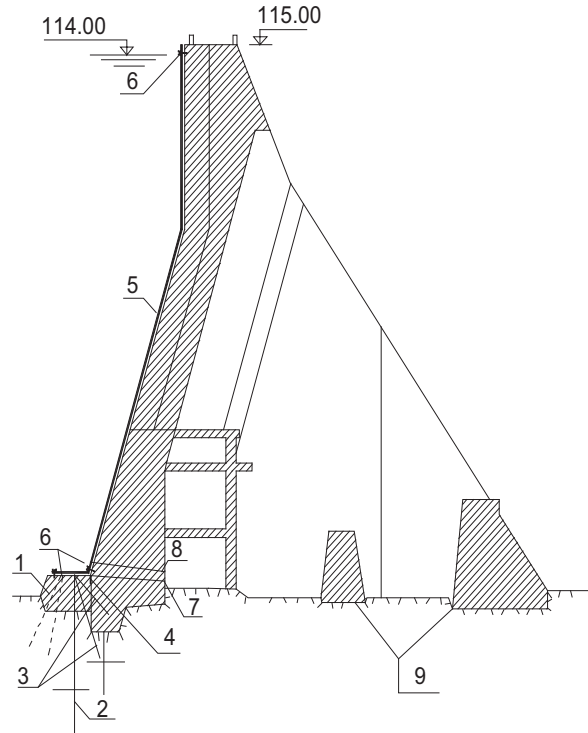
PROFILÉ DE TENSIONNEMENT BREVETÉ



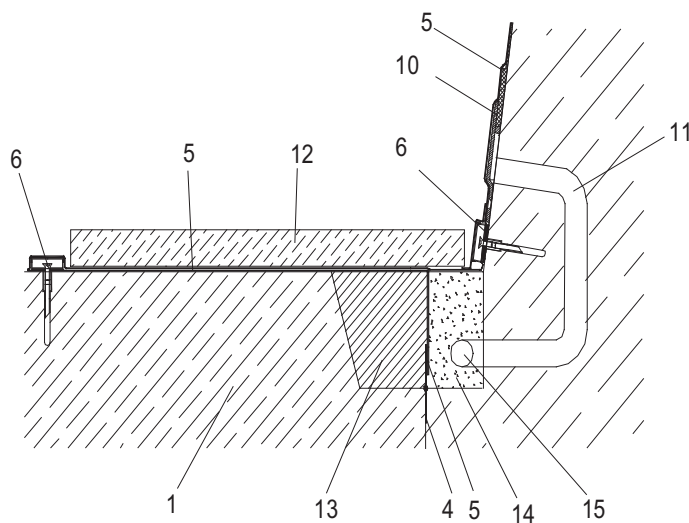
- 3. Parement amont en maçonnerie
- 14. Ancrage chimique
- 20. Système d'ancrage en acier inoxydable
- 10. Bande de gunite de régularisation
- 21. Profilé inférieur en acier inoxydable
- 6. Géocomposite PVC
- 22. Profilé supérieur en acier inoxydable
- 23. Bande de couverture en PVC (géomembrane PVC 2,5 mm)
- 24. Soudure

5.6.2. Réhabilitation d'un barrage à contreforts affecté par alcali-réaction, géomembrane PVC exposée, installation à sec

Annexe 1 : barrage de Pracana, Portugal 1992



1. Plinthe amont
2. Écran étanche
3. Injection chimique
4. Waterstop
5. Géocomposite PVC (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile 500 g/m²)
6. Joint périphérique étanche
7. Drainage de la fondation
8. Évacuation du drainage du géocomposite amont
9. Traverses béton

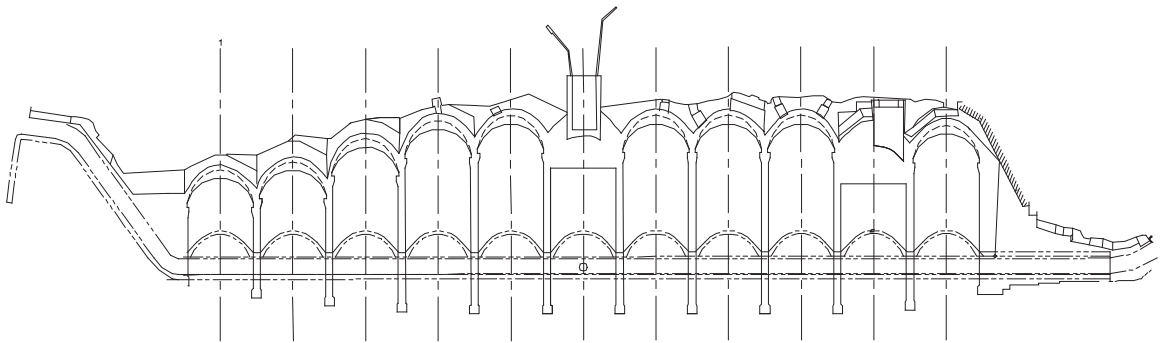


10. Géocomposite PVC sur parement amont - Plaque de drainage anti-intrusion
11. Tuyau d'évacuation du drainage
6. Joints périphériques étanches
5. Géocomposite PVC sur nouvelle plinthe béton
12. Dalle de béton
1. Nouvelle plinthe béton
13. Seconde phase nouveau béton
4. Waterstop
5. Géocomposite PVC
14. Béton poreux
15. Collecteur de drainage

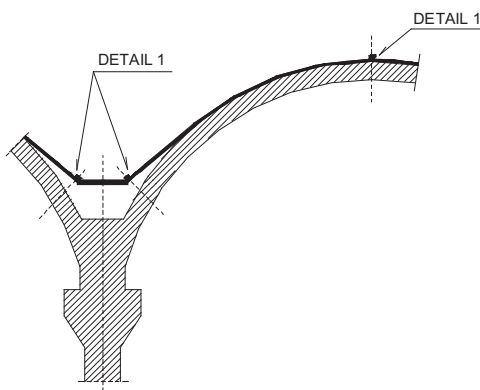
5.6.3. Réhabilitation du barrage à voûtes multiples, géomembrane PVC exposée, installation à sec

Annexe 1 : barrage de Butgenbach, Belgique 2004

PLAN

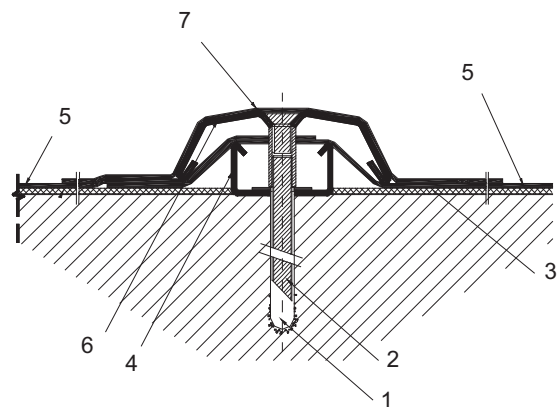


SECTION DE LA VOUTE



DETAIL "1"

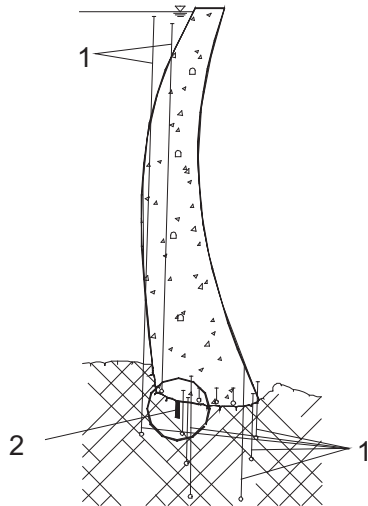
(FIXATION VERTICALE)



1. Ancrage chimique
2. Système d'ancrage en acier inoxydable
3. Géofilet
4. Profilé inférieur en acier inoxydable
5. Géocomposite PVC (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile 500 g/m²)
6. Profilé supérieur en acier inoxydable
7. Bande de couverture en PVC (géomembrane PVC 2,5 mm)

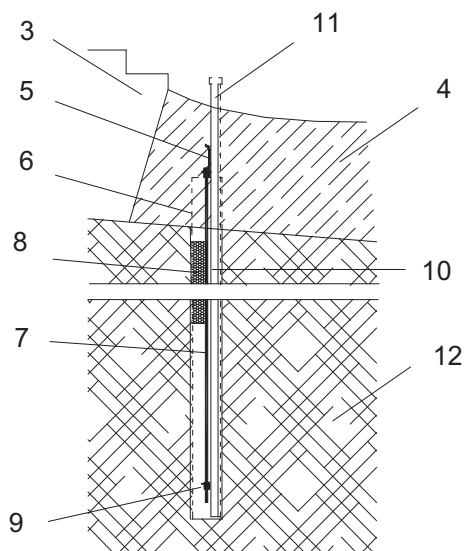
5.6.4. Nouveau parafouille élastique, géomembrane PELBD

Annexe 1 : barrage de Schlegeis, Autriche 1981



- 1. Cellules de sous-pressions et piezomètres
- 2. Nouveau parafouille élastique (voir détail)

DETAIL DU PARAFOUILLE ELASTIQUE

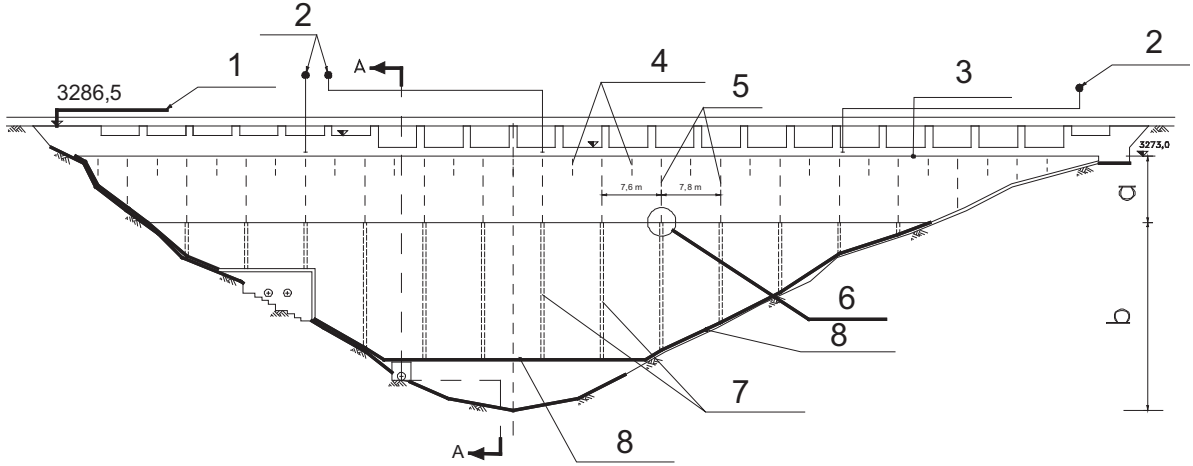


- 3. Vieux barrage en béton
- 4. Nouveau radier béton
- 5. Tôle de cuivre
- 6. Tuyau en S
- 7. Géomembrane
- 8. Gravier + mousse de polyuréthane
- 9. Angles en acier
- 10. Matériel plastique
- 11. Tuyaux verticaux pour futures injections
- 12. Fondation

5.6.5. Réhabilitation d'un barrage voûte, géomembrane PVC exposée, installation immergée

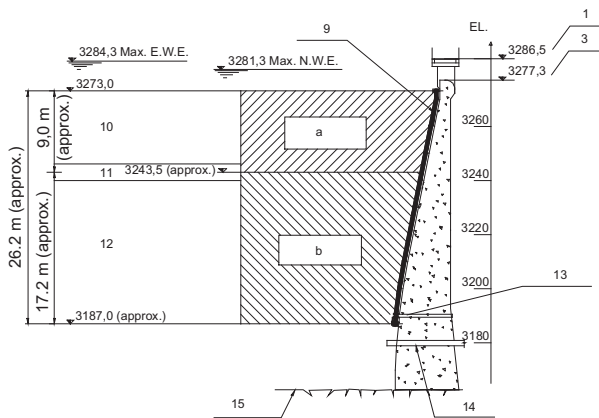
Annexe 1 : barrage de Lost Creek, États-Unis 1997

PAREMENT AMONT



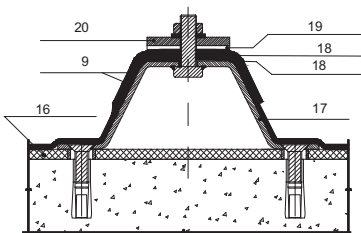
- | | |
|--------------------------|--|
| a. Installation à sec | 4. Profils intermédiaires à l'air libre |
| b. Installation immergée | 5. Profils primaires à l'air libre |
| 1. Tablier routier | 6. Profils de transition à l'air libre/ profils immergés |
| 2. Tuyaux de ventilation | 7. Profils immergés |
| 3. Joint supérieur | 8. Joint périmétrale inférieur |

SECTION SCHEMATIQUE - El. en pieds



- | |
|---|
| a. Installation à sec |
| b. Installation immergée |
| 1. Tablier routier |
| 3. Déversoir en couronnement |
| 9. Géocomposite PVC (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile 500 g/m ²) |
| 10. Joint supérieur, profils primaires, profils intermédiaires, joint inférieur |
| 11. Section de transition |
| 12. Profils immergés, joint inférieur |
| 13. Décharge du drainage |
| 14. Canal d'évacuation (existant) |
| 15. Tracé supposé de la fondation rocheuse |

SECTION C-C
(sous l'eau)



- | |
|---------------------------------|
| 16. Géofilet |
| 17. Profilé en acier inoxydable |
| 18. Joint biadhésif |
| 9. Géocomposite PVC |
| 18. Joint biadhésif |
| 19. Joint caoutchouc |
| 20. Plat en acier inoxydable |

6. GÉOMEMBRANES POUR LES BARRAGES EN BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU - NOUVELLE CONSTRUCTION, RÉHABILITATION ET JOINTS INDUITS

Parmi environ 290 barrages BCR construits jusqu'à 2006, il en existe 34 qui comprennent une géomembrane comme dispositif d'étanchéité. Les géomembranes ont été utilisées pour couvrir tout le parement, soit exposées, soit couvertes, ou encore pour étanchéifier des joints ou fissures. Ces 34 barrages BCR sont parmi les plus élevés (Miel 1, Colombie, 188 m, 2002) et les plus grands (Olivenhain, Etats-Unis, 1 500 000 m³), ont été construits dans des régions sismiques et permettent en général un contrôle des fuites extrêmement performant comparé à celui des barrages BCR sans géomembrane.

Certaines de ces installations ont déjà plus de 20 ans en exploitation, et présentent toutes d'excellentes performances. Le type de géomembrane le plus utilisé est le PVC (31 de 34).

Tableau 31
Géomembranes dans les barrages BCR

GÉOMEMBRANE SUR	POSITION	TOTAL	PVC	PEHD	PELBD
Parement complet	Exposées	11 + 1 inconnu	11	0	0
	Couvertes	17	15	1	1
Joints	Exposées	3	3	0	0
	Couvertes	0	0	0	0
Fissures	Exposées	3*	3*	0	0
	Couvertes	0	0	0	-0
Installation la plus grande [m ²]		38 880	38 880	n.a. *	n.a. **
Barrage le plus élevé [m]		188	188	n.a. **	40
Hauteur maximale [m]		1160	1160	n.a. **	220
Installation la plus ancienne en		1984	1984	n.a. **	1992
Installation la plus récente en		2006	2006	n.a. **	1992

* Une installation sur un barrage qui avait déjà une géomembrane sur les joints.

** Non disponible.

*** L'installation de dispositifs exposés et couverts se poursuit toujours.

Ce chapitre présente l'utilisation de géomembranes pour la construction et la réparation de barrages BCR.

De nombreuses sections sont similaires à celles qui concernent les barrages en remblai et barrages béton, et nous citerons les paragraphes concernés. La même remarque s'applique à la réhabilitation des fissures et joints défailants.

6.1. GAMME D'APPLICATIONS

6.1.1. Applications pour la construction de nouveaux barrages

La construction de barrages BCR est économique et présente de nombreux avantages. Toutefois, les percolations à travers les barrages BCR peuvent poser un problème. Dans certains cas, les percolations apparaissant sur la face aval du barrage peuvent être acceptables en termes de stabilité structurelle, mais peuvent inquiéter l'opinion publique. Il existe des exemples de réactions alarmées à l'apparition de fuites en face aval. Cette réaction s'explique lorsque le public compare l'apparence du parement béton en face aval avec des ouvrages en béton plus classiques.

À l'heure actuelle une tendance s'oriente vers l'utilisation de mélanges béton à faible teneur en ciment pour la construction des barrages BCR. Ils permettent une plage de température plus importante pour leur mise en place, des contraintes en traction réduites en raison de contractions thermiques moindres, et une construction plus facile en général. Une teneur faible en ciment ($< 120 \text{ kg/m}^3$) signifie un mélange BCR moins résistant, mais qui assurera la fonction statique du corps du barrage avec un facteur de sécurité acceptable.

La masse du BCR n'est pas aussi homogène que l'on pourrait le souhaiter, en raison des caractéristiques inhérentes aux procédures de construction. Une attention spéciale doit être portée à la variabilité des caractéristiques de la masse du béton compacté, telles que la perméabilité, à cause du procédé de construction. Il peut en résulter des zones montrant de la ségrégation ou une densité moindre.

Les problèmes clés qui doivent être résolus pour les barrages BCR sont la perméabilité relativement élevée du béton sec à faible teneur en ciment, la perméabilité des joints entre levées, et la probabilité élevée de voir apparaître un joint de reprise au contact entre le BCR et le béton conventionnel du parement amont en raison des contraintes thermiques.

Les barrages BCR construits avec des teneurs en ciment élevées présentent des perméabilités plus faibles sur les joints entre levées. Toutefois, alors qu'on pourrait en attendre une perméabilité inférieure susceptible de résoudre le problème mentionné, on observe en réalité une perméabilité assez élevée en raison de la fissuration thermique accrue du béton.

Le BCR à haute teneur en ciment est moins facile à mettre en œuvre en raison des contrôles très stricts sur la température du béton pendant le mélange et la mise en place, des spécifications plus exigeantes et du suivi complexe des températures, même avec des dispositifs de refroidissement, d'une attention spécifique à porter aux joints horizontaux entre levées et à leur traitement ultérieur pour assurer l'imperméabilité, des dispositions de traitement spécifiques pour tous les joints « froids », et des procédures de contrôles et précautions plus strictes.

Le problème principal de la percolation à travers un barrage BCR concerne la stabilité, ainsi que le risque élevé de détérioration du BCR provoqué par le lessivage

du ciment par l'eau infiltrée. La rupture en 2004 du barrage BCR de Camara au Brésil, construit en 2002, prouve que la percolation peut avoir des conséquences tragiques.

La solution pour répondre aux problèmes énumérés ci-dessus consiste à étanchéifier le barrage BCR par un dispositif séparé indépendant sur le parement amont. La fonction d'étanchéité est séparée de la fonction statique. En conséquence, des dispositifs de parement plus sophistiqués ont été mis en place sur les barrages BCR récents avec un succès croissant. Il existe deux solutions principales : le masque amont béton ou la géomembrane synthétique.

Les parements amont en béton ont été réalisés avec du béton conventionnel vibré (BCV) mis en place en même temps que le BCR ou en utilisant la technique du masque coulé au moyen de coffrages grimpants à vibration interne, ou celle du BCR enrichi au coulis. Un parement amont en béton conventionnel mis en œuvre simultanément avec le BCR du corps du barrage peut être considéré comme une solution logique d'un point de vue conception. Néanmoins, cela requiert un plus grand soin qu'il est normalement nécessaire lors de mise en place du BCV, une formulation du BCV différente de celle du BCR, et cela nécessite un dispositif de protection contre les infiltrations au niveau des joints verticaux induits associés au BCV. Cela entraîne une conception plus compliquée, l'utilisation de matériaux géosynthétiques tels que des joints waterstop noyés dans le BCV ou des éléments d'étanchéité exposés. La combinaison et l'interférence entre la mise en place du BCR et du BCV compliquent la construction de l'ensemble du barrage, avec un impact significatif sur le programme des travaux et sur les coûts du projet.

Depuis 1984, des géomembranes synthétiques préfabriquées en usine ont été adoptées comme alternative au béton pour la construction d'un parement amont étanche pour les barrages BCR. Les fonctions sont clairement séparées. Le BCR, qui assure la fonction structurelle, est construit de manière simple, rapide et économique. La géomembrane synthétique, qui crée une barrière imperméable, couvre tout le parement amont du barrage, y compris les joints de dilatation et les fissures éventuelles. Il est équivalent au niveau conceptuel à un waterstop unique exposé. La géomembrane imperméable synthétique est fixée directement sur le corps en BCR comme élément séparé, à la fin, ou même en cours de construction du corps, et sa mise en place tardive n'interfère pas avec la construction.

L'utilisation de géomembrane amont offre non seulement une technique efficace, mais permet des économies et des calendriers plus courts, en adoptant des procédures de construction et de contrôle-qualité moins strictes.

L'adoption d'un dispositif par géomembrane peut permettre des réductions de coût significatives en comparaison avec les méthodes traditionnelles assurant une imperméabilité amont.

Des économies importantes peuvent être réalisées pour tous ou pour la plupart des éléments suivants, si une géomembrane est utilisée comme parement amont sur un barrage BCR.

- Réduction de la teneur en ciment
- Réduction ou suppression de la pouzzolane
- Réduction des cendres volantes
- Possibilité d'utiliser des matériaux locaux plus facilement disponibles pour le BCR

- Suppression des budgets pour le refroidissement
- Réduction du mélange pour les joints entre levées
- Suppression ou réduction des waterstops des joints de dilatation amont
- Réduction des coûts globaux pour le traitement des joints horizontaux.

En conséquence, alors que le Bulletin 78 CIGB publié en 1991 mentionnait 2 barrages BCR présentant un DEG, en 2006 ce nombre s'élève à 34 barrages, et d'autres sont en cours de construction en 2007, 2008, 2009 et 2010.

6.1.2. Application à la réhabilitation des barrages BCR

C'est en 2000 que les premières utilisations pour la réhabilitation des barrages BCR ont été observées. Jusqu'ici, ces réhabilitations ont concerné l'étanchéité de fissures qui sont apparues sur des barrages BCR, ainsi que des joints défailants.

La mise en œuvre d'une géomembrane pour réhabiliter des barrages BCR est semblable à celle des barrages béton conventionnels, décrite au Chapitre 5.

Les principes de conception et les techniques d'installation sont similaires lors de l'étanchéification des joints induits en construction, et pour la réhabilitation des fissures et joints défailants, et sont donc décrits conjointement.

6.2. PRINCIPES DE CONCEPTION

6.2.1. Généralités

En addition à ce qui a déjà été présenté pour les barrages béton au chapitre 5, dans les barrages BCR la géomembrane amont présente un avantage particulier pour résoudre le problème des sous-pressions internes provoquant une baisse de stabilité.

Le manuel publié en 1995 par le *United States Army Corps of Engineers* indique clairement que les valeurs de sous-pression à prendre en compte lors des études ou des analyses des barrages BCR sera déterminé pour chaque projet sur la base de « ... la perméabilité du mélange, le traitement des joints entre levées, les techniques de mise en place spécifiées pour minimiser la ségrégation dans le mélange, et le traitement d'étanchéité sur le parement amont... ». L'ouvrage « *Advanced Dam Engineering for*

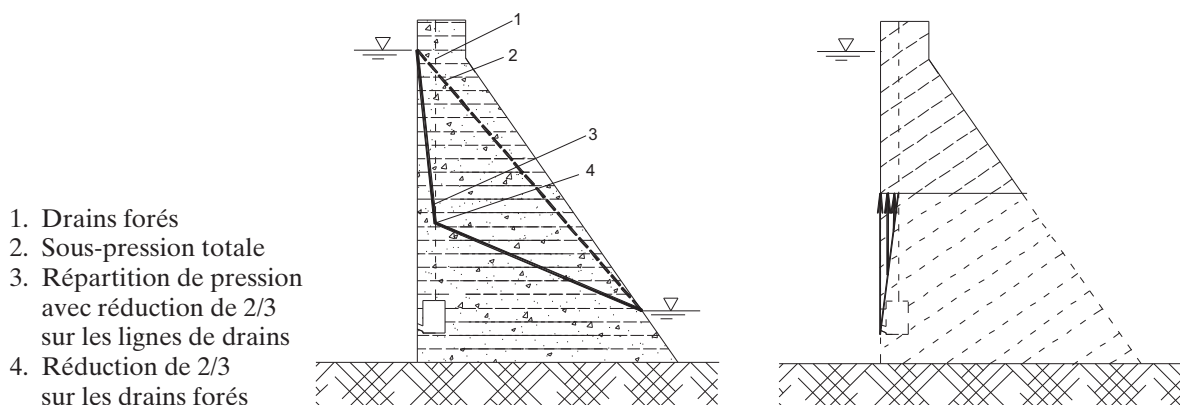


Fig. 109
 Réduction de sous-pression sans contrôle de percolation amont

Design, Construction, and Rehabilitation » est une autre source faisant autorité au niveau international, qui mentionne le fait que « dans les constructions BCR, une attention particulière doit être accordée aux joints horizontaux entre les levées » et que « des mesures spéciales de contrôle de la percolation pouvant être utilisées sur les barrages BCR comprennent... l'utilisation d'une géomembrane élastomère étanche sur le parement amont... ». En 1988, cette référence suggérait « Avec un drainage en parement, on considère que la sous-pression varie de 50 % de la charge hydrostatique en parement amont, jusqu'à zéro ou à la charge hydrostatique aval, le cas échéant, sur la face aval ». Lorsque des drains forés à l'intérieur sont utilisés en conjonction avec une membrane amont et un dispositif de drainage en parement, on considère en général qu'ils assurent une réduction supplémentaire atteignant 2/3 (66 %) sur les lignes de drains. Les chiffres de réduction dépendent du pays.

La réduction de sous-pression est donc fonction de l'étanchéité du parement amont et de l'efficacité des drains. Les dispositifs d'étanchéité par géomembranes se sont révélés une solution optimale de protection contre la percolation, qui approche de zéro sur le parement. Ceci s'explique par leur perméabilité extrêmement faible, et par le fait que leur installation conjointe avec une couche drainante sous la

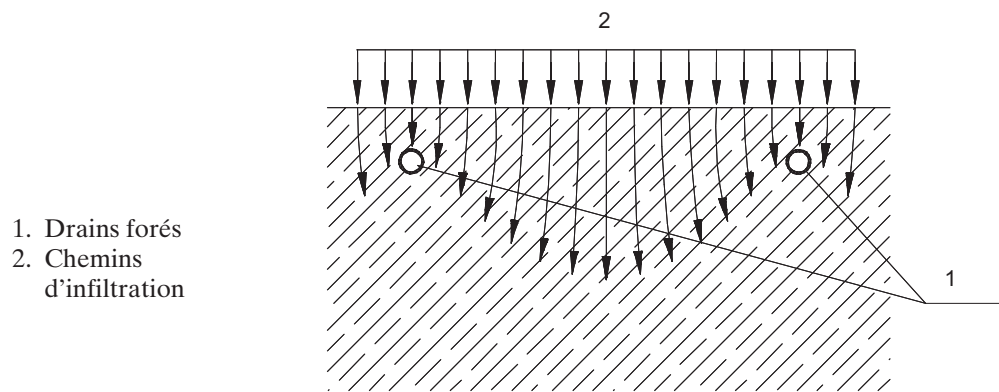


Fig. 110
Section horizontale

Les drains percés ne collectent pas toute l'eau infiltrée, qui pénètre dans le corps du barrage

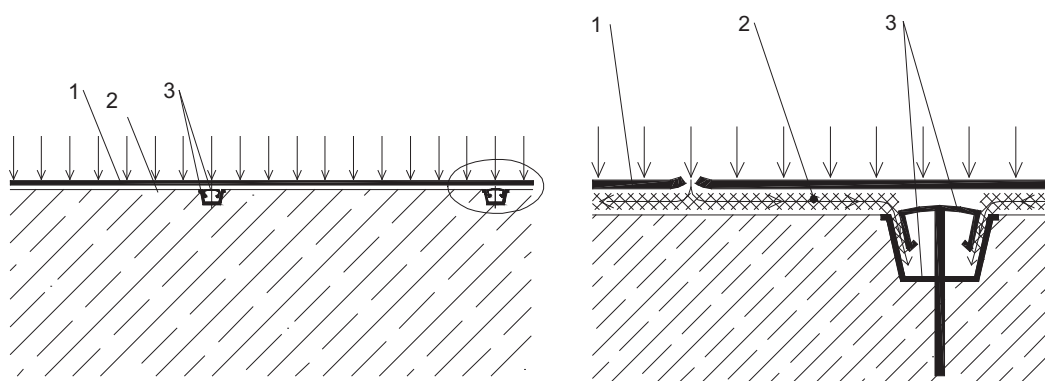


Fig. 111

L'eau d'infiltration recueillie par le drainage en parement, et par les conduits de drainage verticaux, est amenée au dispositif de collecte et d'évacuation en pied

1. Géomembrane
2. Couche drainante continue en parement
3. Profilés d'ancrage brevetés formant un conduit de drainage vertical

géomembrane leur permet de couvrir tous les points potentiels d'infiltration de l'eau, les joints entre levées et les joints de dilatation, les fissures induites et celles qui peuvent apparaître pendant la durée de vie du barrage.

Alors que les méthodes traditionnelles de collecte des eaux infiltrées par des drains verticaux placés dans le barrage BCR ne permettent pas d'intercepter suffisamment tous les chemins d'infiltration de l'eau et donc d'envisager une réduction importante des sous-pressions, le système de drainage incorporé au DEG est étudié de manière à drainer tout le parement amont, et à évacuer l'eau par des conduites de collecte et d'évacuation associées.

On peut considérer donc que l'efficacité du drainage est totale sur le parement. La réduction des sous-pressions par drainage atteint donc 100 %.

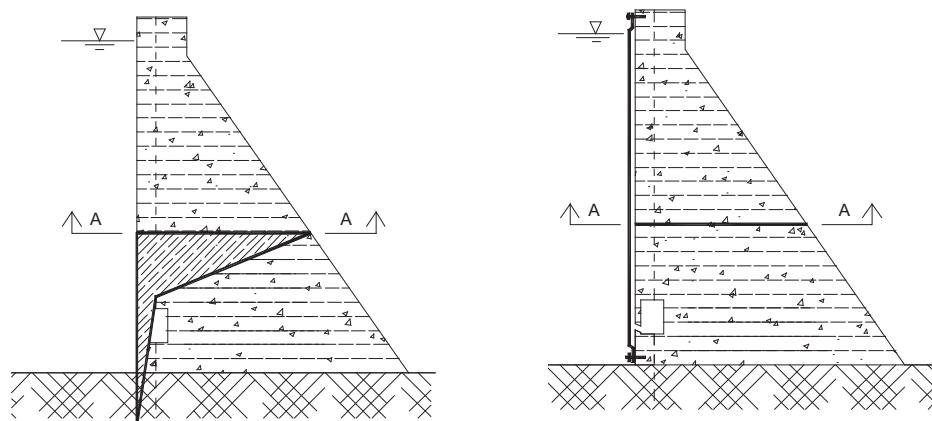


Fig. 112

Sous-pression sur une section du barrage sans (à gauche) et avec (à droite) une géomembrane drainée amont de manière garantie

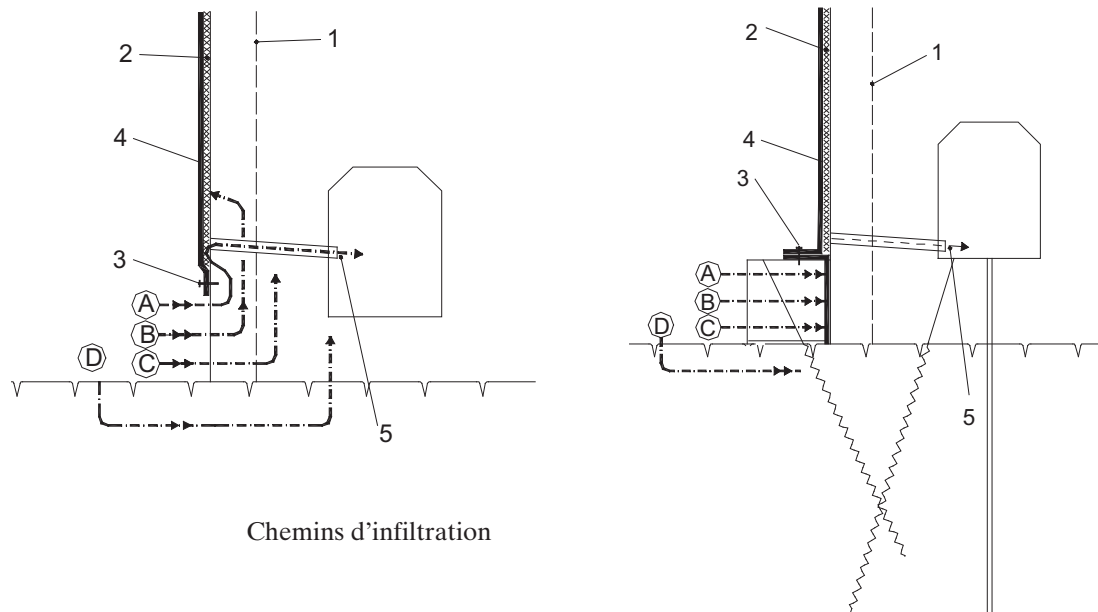
Les sous-pressions naturelles en fondation du barrage peuvent également être réduites par un dispositif de connexion étanche entre la géomembrane et un système d'étanchéité de fondation de type écran étanche ou mur parafouille pour contrôler l'infiltration en pied. La présence d'une plinthe périphérique en pied du parement amont, avec un écran étanche peu profond reliant la plinthe avec le rocher et interceptant l'écran étanche venant de la galerie, réduira les chemins d'infiltration éventuels subsistants en provenance du réservoir, qui traversent théoriquement :

- La fondation perméable
- La partie inférieure de joints verticaux défailants
- Les joints entre levées qui ne sont pas parfaitement traités.

On tiendra compte également du fait que l'utilisation d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane peut simplifier la préparation du mélange BCR en permettant d'en réduire la teneur en ciment et/ou en pouzzolane. Le Tableau 32 présente les teneurs en ciment des mélanges BCR pour des barrages qui ont prévu une géomembrane lors de leur conception (source : Water Power & Dam Construction, 1998).

De la même manière que pour les barrages-poids, le dispositif d'étanchéité par géomembrane des barrages BCR est divisé en deux groupes principaux :

- Dispositifs d'étanchéité exposés
- Dispositifs d'étanchéité couverts.



Chemins d'infiltration

1. Waterstop dans le joint
2. Couche drainante
3. Joint périphérique
4. Géomembrane
5. Décharge du drainage

- A. À travers les joints du béton
- B. À travers les joints verticaux
- C. À travers des waterstops défectueux
- D. À travers la fondation

Fig. 113 et 114

Chemins d'infiltration possible sous la géomembrane. La construction d'une plinthe périphérique avec un écran étanche peu profond supprime les chemins d'infiltration A, B, C et D

Tableau 32
Teneur en ciment ou pouzzolane dans les barrages BCR équipés d'un DEG

BARRAGE	PAYS	CIMENT	POUZZOLANE
		(kg/m ³)	(kg/m ³)
Winchester	États-Unis	104	0
Urugua I	Argentine	60	0
Concepción	Honduras	95	0
Riou	France	0	120
Siegrist	États-Unis	9	34
Nacaome	Honduras	64	21
Big Haynes	États-Unis	42	42
Burton Gorge	Australie	85	0
Spring Hollow	États-Unis	53	53
Balambano	Indonésie	78	42

6.2.2. Dispositifs d'étanchéité exposés

Le dispositif exposé, dont une solution technique est brevetée, comprend une géomembrane installée sur le parement amont du barrage, et donc directement exposée à l'eau du réservoir et à l'environnement.

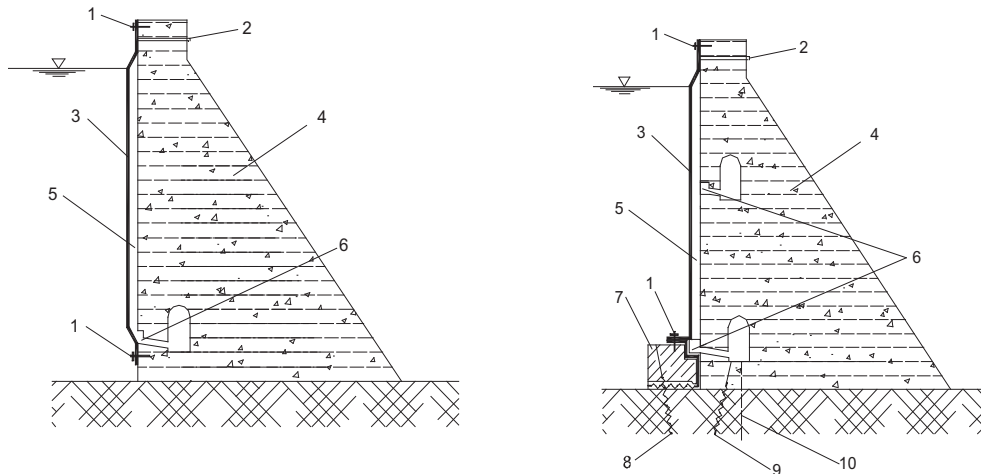


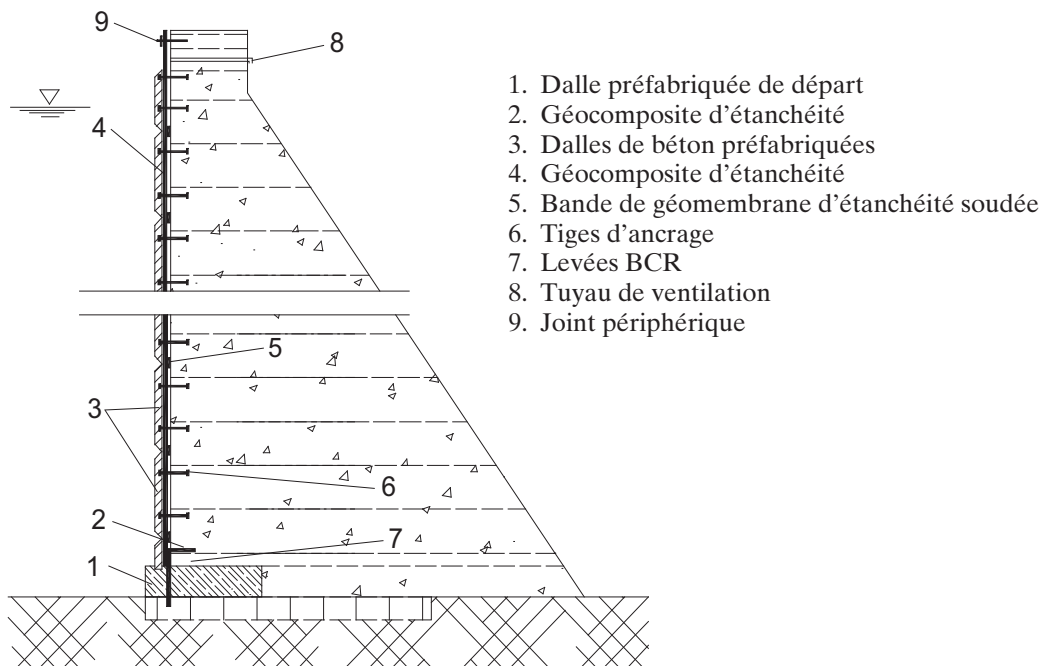
Fig. 115 et 116

Coupes conceptuelles du dispositif exposé sans et avec plinthe

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Joints périphériques 2. Tuyau de ventilation 3. Géocomposite d'étanchéité 4. Levées BCR 5. Ancrage vertical et drainage pour géocomposite | <ol style="list-style-type: none"> 6. Drain rectangulaire pour collecte périphérique du drainage 7. Plinthe périphérique (option) 8. Injections de contact 9. Écran étanche 10. Drainage de la fondation |
|--|---|

6.2.3. Dispositifs d'étanchéité couverts

La solution couverte, qui est brevetée, est la suivante : elle comporte une géomembrane coulée sur des panneaux préfabriqués servant de coffrages pour la mise en place du BCR ; la géomembrane est ainsi noyée dans le béton sauf au niveau des joints ouverts des panneaux en béton, en pleine communication avec l'eau de la retenue.



1. Dalle préfabriquée de départ
2. Géocomposite d'étanchéité
3. Dalles de béton préfabriquées
4. Géocomposite d'étanchéité
5. Bande de géomembrane d'étanchéité soudée
6. Tiges d'ancrage
7. Levées BCR
8. Tuyau de ventilation
9. Joint périphérique

Fig. 117

Coupe conceptuelle du dispositif protégé

6.2.4. Comparaison des deux systèmes

Dans les deux cas, la géomembrane imperméable intercepte toute infiltration d'eau sur l'ensemble de la surface étanchéifiée, car elle couvre et rend définitivement étanche la face du BCR, les joints entre levées et les joints de construction. Du point de vue de l'étanchéité, on peut considérer la géomembrane comme un seul grand waterstop couvrant tout le parement, alors que les méthodes conventionnelles de construction des barrages BCR ne demandent qu'une étanchéité sur les joints de construction, fournie en général par des waterstops en PVC. La présence de la géomembrane qui permet d'éviter toute infiltration d'eau dans les joints entre levées horizontales du barrage, réduit notablement de nombreuses contraintes de conception, comme la mise en place d'une couche de béton conventionnel sur le parement amont, des mélanges spécifiques de stratification ou des traitements spéciaux de collage des joints. Ceci permet même de ne placer qu'un seul mélange BCR sur toute la hauteur du barrage, sans avoir à prendre en compte un mélange spécifique pour les joints entre levées, ni de béton conventionnel sur le parement amont. Bien que les joints horizontaux entre levées ne soient pas critiques pour l'étanchéité du barrage, un mélange spécifique pour les joints peut toutefois encore être nécessaire pour des raisons de contraintes en cisaillement et de stabilité du barrage. Dans certains projets, un mélange pour le parement amont a été nécessaire, mais seulement sur une épaisseur très limitée contre le coffrage du parement amont. Son emploi était en général imposé par le besoin d'obtenir un bon compactage du BCR sur le parement amont, en assurant une bonne finition de la surface de béton amont. Des exemples de barrages BCR sans mélange sur le parement amont, et équipés uniquement d'une géomembrane exposée sont ceux de Concepción et Nacaome (Honduras), Riou (France), Balambano (Indonésie), et d'une géomembrane couverte à Penn Forest et Buckhorn (États-Unis).

La solution exposée présente certains avantages économiques et techniques par rapport à la solution couverte. L'un des avantages techniques est la présence d'un dispositif de drainage efficace en parement. Un dispositif de drainage en parement présente des avantages au niveau des études, et pendant toute la durée de vie de la géomembrane imperméable.

Lors des études, la prise en compte d'un drainage en parement permet de réduire les sous-pressions de projet, et ceci est très largement accepté par les experts internationaux. Les avantages apportés par la présence d'un dispositif de drainage en parement pendant l'exploitation concernent les aspects suivants :

- Auscultation : la mesure et le contrôle du volume d'eau drainé permettent de surveiller les performances du dispositif d'étanchéité de manière continue, en comparant les fluctuations à un volume moyen ou « normal » évalué correspondant à un comportement satisfaisant du barrage et de son revêtement étanche. En conséquence, un dispositif de drainage du parement amont permet un suivi et un contrôle plus précis des percolations. Avec une conception appropriée, la surveillance et la localisation d'un dysfonctionnement potentiel peuvent être très précises, et permettre un accès facile et rapide pour la réparation.
- Sécurité du barrage : un dispositif de drainage du parement amont permet d'éviter toute accumulation d'eau derrière le revêtement étanche en cas de dommage accidentel à la géomembrane étanche. Il peut supprimer la

migration d'eau à travers les joints entre levées du corps du barrage, et donc abaisser les niveaux de saturation et les pressions interstitielles dans le barrage, avec des effets positifs sur les facteurs de stabilité, sur les phénomènes éventuels de réactions alcali-granulats (RAG) et sur l'esthétique de la face aval. La sécurité sur les joints entre levées est améliorée, et la montée des sous-pressions dans le barrage lui-même est évitée.

- Sécurité de la couche d'étanchéité en cas de baisse rapide du réservoir : le drainage évite que l'eau ne s'accumule derrière le revêtement, ce qui assure que lors de la vidange, ce dernier ne sera pas soumis à une pression inverse non-équilibrée.

Parmi tous les barrages BCR qui intègrent une géomembrane synthétique, 17 comprennent un dispositif exposé, et 17 un dispositif couvert. Les deux configurations impliquent une philosophie, des procédures de construction et une maintenance différentes.

6.3. CHARGES

Les différents cas de chargement présentés au chapitre 3 concernent également les barrages BCR. La charge provoquée par le poids de la géomembrane sur le parement vertical du barrage engendre des efforts de traction qui doivent être repris par un dispositif d'ancrage approprié. En général, les considérations sont similaires à celles du chapitre 5 pour les barrages poids.

6.4. DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITE PAR GÉOMEMBRANE

6.4.1. Généralités

Suivant l'option – exposé ou couvert – les principales spécifications du dispositif d'étanchéité par géomembrane sont :

Tableau 33
Spécifications

Spécifications	DEG exposé	DEG couvert
Étanchéité fournie par la géomembrane et son raccordement étanche à la structure du barrage	Assurée	Assurée
Drainage derrière la géomembrane pour collecter l'eau infiltrée à travers le barrage	Assurée	Option préférable
Ventilation derrière la géomembrane pour équilibrer les variations de pression atmosphérique, pour éviter l'augmentation de la pression de vapeur et permettre un écoulement de drainage libre	Assurée	Option préférable
Ancrage de la géomembrane	Assuré	Assuré
Couche de couverture externe pour la protection de la géomembrane	Non applicable	Assuré

Le dispositif exposé, tel qu'il est décrit dans le Bulletin 78 CIGB publié en 1991, et concernant le barrage de Riou (1990), a été adopté pour tous les barrages BCR avec géomembrane exposée. Le dispositif ancre le DEG sur toute la face amont. La géomembrane est installée sur l'ensemble des levées BCR et couvre le parement complet du barrage. Dans les applications les plus récentes, la poutrelle pour effectuer les injections au pied du barrage est elle aussi étanchéifiée par une géomembrane pour éviter les percolations aux joints et pour raccorder la géomembrane du parement amont avec le rideau étanche.

Le dispositif d'étanchéité par géomembrane exposé présente l'avantage d'inspections et de réparations faciles le cas échéant.

Le dispositif d'étanchéité par géomembrane couverte présente une couche de protection au dessus de la géomembrane.

Le dispositif d'étanchéité couvert comprend :

- Une couche d'étanchéité composée de nappes de géomembrane préfabriquée de 2 mm d'épaisseur au minimum, recouverte par les panneaux de béton préfabriqués.
- Une couche de couverture constituée par le bétons des panneaux préfabriqués.

Dans les aménagements les plus récents uniquement, une couche de protection sur la géomembrane qui consiste en un géotextile non tissé aiguilleté est utilisée ; la plupart du temps, le géotextile et la géomembrane sont assemblés ensemble en usine pour former un géocomposite ; l'objectif du géotextile est de protéger la géomembrane et de la fixer au béton des dalles.

Le revêtement est en général une géomembrane PVC fixée aux panneaux de béton préfabriqués, pendant le coulage de celles-ci, par noyage de la couche laminée constituée d'un géotextile polypropylène. Pour le dispositif couvert, la couche de couverture en béton est préfabriquée avec la géomembrane en usine ou sur site. Les panneaux sont fixés au barrage par des barres d'ancrage noyées dans les levées BCR. Les joints entre les dalles sont étanchéifiés par des bandes de couverture soudées.

6.4.2. Géomembrane

Les mêmes considérations que pour les barrages en béton s'appliquent. Le type de géomembrane exposée installée sur la plupart des aménagements BCR est le même que celui utilisé en réhabilitation, et consiste en une géomembrane PVC, d'épaisseur 2,5 à 3,0 mm, pré-assemblée lors de sa fabrication à un géotextile de 200 à 700 g/m². Pour les dispositifs couverts, on utilisait autrefois une géomembrane PVC de 1,5 à 2,0 mm PVC pré-assemblée en usine à un géotextile de 200 à 700 g/m². Actuellement l'épaisseur minimale est de 2 mm. Le géotextile doit être composé de fibres polypropylène pour résister à l'agression du béton frais, ou de fibre polyester s'il n'est pas en contact avec le béton, par exemple lorsqu'un géofilet de drainage est utilisé (Olivenhain, États-Unis, 2002).

Pour la géomembrane, les aspects évoqués au Chapitre 5 pour les barrages en béton s'appliquent également aux barrages BCR.

6.4.3. Surface support et protection inférieure de la géomembrane étanche

La géomembrane ayant une perméabilité très faible (10^{-12} m/s), il n'est pas nécessaire de mettre en place un masque amont béton imperméable ou un mortier de support. La géomembrane est appliquée directement sur les levées BCR. Celles-ci présentent une surface qui est en général moins régulière qu'un béton conventionnel, on en contrôle la stabilité et l'absence de nids d'abeilles. En général, l'utilisation d'un coffrage métallique est la solution la plus adaptée pour obtenir une surface lisse, car sa résistance permet un compactage plus efficace pour le BCR. Dans la plupart des cas le béton amont et le mortier entre couches sont mis en place pour assurer la résistance de la liaison entre levées et pour fournir une « ligne de défense » supplémentaire. Ce mortier entre levées, suivant la méthode et l'énergie de compactage, est pressé contre le coffrage pour fournir une surface plus lisse que celle du béton compacté rouleau. Si la surface est irrégulière, un géotextile anti-poinçonnement additionnel peut être installé, mais nous n'avons pas d'exemple pour lequel cela a été nécessaire.

Sur les joints induits verticaux, un support supplémentaire peut être nécessaire pour éviter la pénétration de la géomembrane dans les joints. Ce type de support dépend du site, et il est décrit plus complètement au Chapitre 7.

6.4.4. Dispositif de drainage et de ventilation

Comme pour les barrages en béton, le drainage d'un barrage BCR présente l'avantage supplémentaire de réduire les sous-pressions de projet, et d'éviter un contact prolongé de l'eau avec les joints entre levées.

Le géotextile laminé sur la géomembrane assure un rôle de drainage. Comme la transmissivité du géotextile est en général supérieure à la perméabilité horizontale des joints entre levées BCR, et du BCR lui-même, l'eau « voyagera » dans le géotextile surtout dans la direction verticale, et n'affectera pas les joints entre levées. Le risque de voir l'eau du réservoir s'infiltrer à travers la face BCR est très faible. Sous pression, par exemple sous la charge hydrostatique, l'épaisseur du géotextile est réduite, et la compression des filaments diminue la transmissivité.

Les géofilettes assurent une transmissivité supérieure, mais ils augmentent le coût du projet et peuvent donner l'impression que le barrage ne fonctionne pas correctement en raison du débit plus important d'eau drainée. Le choix d'installer ou non un géofilette est fondé sur des considérations politiques (psychologiques) plutôt que techniques. Le maître d'ouvrage peut désirer éviter une perception négative chez le public à la vue de l'eau s'écoulant dans la galerie de drainage.

La couche de drainage doit être ouverte en crête pour la ventilation. La communication avec l'atmosphère libre est assurée soit par une ouverture dans la géomembrane au dessus du niveau d'eau maximal, soit en prolongeant les profilés d'ancrage jusqu'à la crête, soit encore par des tuyaux noyés dans la surface des levées BCR et sortant en face aval. Les tuyaux de ventilation peuvent également déboucher dans la galerie, suivant ce qui se révèle le plus pratique. On place théoriquement un tuyau de ventilation tous les 15 ou 20 m horizontalement.

6.4.5. Collecte et évacuation des eaux drainées

La collecte en pied s'effectue généralement par une conduite périphérique, positionné en pied du barrage. La collecte s'effectue par l'intermédiaire d'un drain rectangulaire noyé dans les levées BCR en cours de construction, ou une bande additionnelle de géofilet comme indiqué au § 5.4.6.

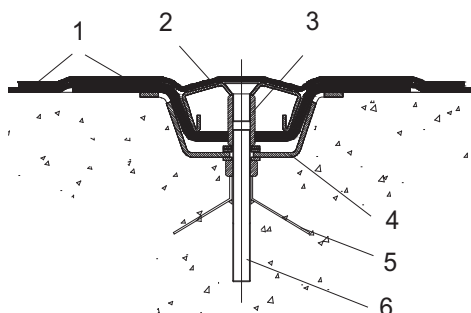
Comme présenté au Chapitre 5 concernant les barrages en béton, pour améliorer le suivi de l'efficacité du dispositif d'étanchéité par géomembrane, on tend à diviser le parement amont en compartiments de surface réduite. Cette division est assez évidente s'il existe plus d'une galerie de visite dans le corps du barrage. Au barrage de Miel 1, Colombie, 2002, d'une hauteur de 188 m, avec un parement amont de 31 500 m², et qui présente 6 niveaux de galeries, le dispositif d'étanchéité par géomembrane exposée a été divisé en 149 compartiments indépendants horizontaux et verticaux. L'eau de chaque compartiment est évacuée séparément dans les galeries correspondantes.

L'évacuation de l'eau peut s'effectuer suivant deux concepts différents. Soit chaque compartiment est drainé séparément, et l'eau est évacuée séparément et directement dans un tuyau d'évacuation transverse vers une galerie de drainage dans le barrage ou en pied – ce qui permet un contrôle plus précis de l'étanchéité de la géomembrane pour chaque compartiment – soit l'eau des compartiments est collectée par un drain rectangulaire et évacuée par un tuyau transverse vers la galerie ou vers l'aval.

6.4.6. Système d'ancrage sur le parement du barrage

Le géocomposite du système d'étanchéité est ancré sur tout le parement du barrage par des dispositifs de serrage positionnés dans des positions verticales parallèles. Ce dispositif de fixation breveté, dérivant du système adopté pour la réhabilitation des barrages en béton, a été adopté sur tous les barrages BCR, avec une configuration un peu différente pour répondre aux besoins spécifiques des sites.

Le dispositif de serrage consiste en deux profilés, installés verticalement, et mettant le revêtement en tension. Leur espacement s'échelonne entre 1,80 m (Riou) et 3,70 m (Balambano, Olivenhain). Le premier profilé en acier galvanisé, équipé d'un dispositif de couplage, est noyé dans le BCR. Le second profilé, en acier inoxydable, est inséré dans le premier après que le revêtement d'étanchéité a été installé, puis étanchéifié par une bande de couverture comme décrit dans la réhabilitation des barrages en béton. L'effet de mise sous tension est similaire à celui décrit pour la réhabilitation des barrages en béton au Chapitre 5.



1. Géocomposite PVC
2. Profilé de tensionnement en acier inoxydable
3. Élément de raccordement
4. Profilé en acier galvanisé noyé
5. Ailes d'ancrage en acier galvanisé
6. Ancrage

Fig. 118
Coupe du principe du dispositif de serrage (breveté)

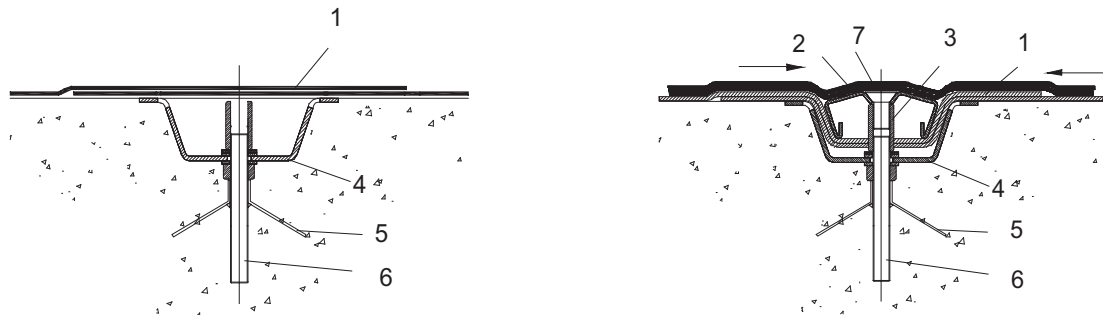


Fig. 119

Effet de mise en tension du dispositif de serrage

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1. Géocomposite PVC | 5. Ailes d'ancrage en acier galvanisé |
| 2. Profilé de tensionnement en acier inoxydable | 6. Ancrage |
| 3. Élément de raccordement | 7. Bande de couverture en PVC |
| 4. Profilé en acier galvanisé noyé | |

Les deux profilés peuvent également être installés sur la face une fois terminée, comme pour la réhabilitation des barrages en béton (voir Fig. 83 et 85).

6.4.7. Ancrage en crête

L'ancrage du dispositif d'étanchéité par géomembranes est le même que celui décrit pour la réhabilitation des barrages en béton au Chapitre 5.

6.4.8. Ancrage sur le périmètre immergé

L'ancrage situé sur le périmètre immergé doit être étanche, de même type en général que celui décrit pour les barrages en béton.

6.5. TECHNIQUES D'INSTALLATION

6.5.1. Dispositifs d'étanchéité exposés

6.5.1.1. Installation simultanée

Pour être certain que la surface de support est adaptée à une installation sûre et à une bonne performance du géocomposite, il est recommandé de faire contrôler et valider, par le maître d'œuvre conjointement avec le contractant assurant l'étanchéité, les surfaces préparées par l'entreprise mettant en place le BCR.

La surface doit être examinée pour vérifier que toutes les irrégularités, aspérités, cavités et nids d'abeille sont compatibles avec la géomembrane prévue (voir Chapitre 5, § 5.4.3) ou qu'elles sont réduites avant l'installation du dispositif d'étanchéité. Une mise à niveau des joints entre levées peut être nécessaire. L'évaluation doit également comprendre les parties noyées dans le système (conduits de drain rectangulaire, profilés de fixation verticaux, tuyaux de ventilation), qui doivent avoir été correctement installés et ne pas avoir été obstrués par le béton. L'injection d'eau dans le dispositif de drainage donne une information utile sur son fonctionnement.

A part la couche de géotextile ou de géofilet située sous la géomembrane, tous les éléments du dispositif de drainage sont en général noyés dans le béton du corps du barrage. Les tuyaux d'auscultation, le cas échéant, sont également noyés dans les levées BCR. Les conduites doivent être fixées avant la mise en place du BCR pour éviter leur déplacement. Le drain rectangulaire périphérique présentera une pente faible pour améliorer l'évacuation. Le raccordement entre les sections des drains et des conduites d'évacuation doit être étanche, pour éviter la pénétration de béton pendant la mise en place. Ils doivent également être flexibles au niveau des joints de dilatation verticaux dans le barrage. Toutes les pièces de métal noyées sont en acier galvanisé.

Une attention particulière doit être accordée aux conduites noyées qui subissent la charge du trafic de construction.

Les tolérances de verticalité et d'espacement des profilés noyés doivent être vérifiées. Aux extrémités supérieures et inférieures des lignes verticales, des profilés coniques sont recommandés pour éviter les angles aigus.

Avant l'installation de la géomembrane, un support supplémentaire doit être placé aux joints de dilatation verticaux du barrage pour que celle-ci n'y pénètre pas sous la pression du réservoir. Les couches support, qui consistent en général d'une ou plusieurs couches supplémentaires de géomembrane, doivent être ancrées dans le BCR par des ancrages frappés.

Sur les barrages très élevés, la mise en place de la géomembrane exposée se fait par sections horizontales, correspondant en général à un compartimentage horizontal de drainage. L'installation par sections horizontales ne nécessite pas en général de soudage transversal du revêtement, et permet l'utilisation de lés qui ne sont pas trop long, et donc plus facilement manipulables par les ouvriers sur les plateformes, tout en minimisant le risque lié au vent pendant l'installation, et donc les problèmes de sécurité associés pour les ouvriers. Lorsque le revêtement est installé en différentes étapes par sections horizontales, il est en général déroulé à partir de plates-formes mobiles suspendues à un dispositif de rail pouvant être monté et démonté à différentes hauteurs. En ce cas, il est nécessaire de donner une protection à la surface d'étanchéité contre la chute d'objets due aux travaux de construction se déroulant au niveau supérieur.

L'installation par étapes au fur et à mesure de la construction du barrage est effectuée depuis la crête ou sur un dispositif de rails installé à une hauteur adéquate sur le barrage. Le dispositif est boulonné en des points spécifiques sur la face du barrage, où des ancrages prévus à cet effet peuvent avoir été noyés auparavant dans le BCR. Le dispositif de rails porte les plates-formes suspendues pour les ouvriers et les treuils pour soulever la géomembrane. Ce système a été utilisé avec succès sur le barrage de Balambano (99 m, Indonésie) et à Miel 1 (188 m, Colombie). La mise en place simultanée du BCR dans les sections supérieures du barrage et de la géomembrane exposée dans les parties inférieures déjà terminées permet une mise en eau précoce du réservoir, une durée de construction réduite et des coûts globaux inférieurs.

Les autres procédures et précautions sont similaires à celles décrites pour les barrages en béton au Chapitre 5.



Fig. 120 et 121
Dispositif de rails à Miel I, Colombie 2002

Comme indiqué au § 5.1.2, les résultats les plus efficaces en termes d'étanchéité sont obtenus lorsque le DEG est raccordé à la couche de fondation et au rideau étanche. Cette solution est facile à mettre en œuvre lors de la construction d'un nouveau barrage BCR, avec un rideau étanche/une plinthe construites en amont. Si la plate-forme d'injection est construite avant la mise en place du BCR, la géomembrane qui doit éviter l'infiltration de l'eau à travers la plinthe est installée sur la plate-forme terminée, et les levées BCR sont mises en place directement sur le revêtement, avec ou sans géotextile antipoinçonnement. Si un temps relativement long doit s'écouler entre le revêtement de la plate forme et la construction du barrage, il est conseillé de couvrir le revêtement d'une protection temporaire de type géomembrane sacrifiée sur les parties verticales, et de type protection en bois sur les parties horizontales pour éviter que la chute de matériaux et d'outils des sections de construction supérieures n'endommage la géomembrane.

Si le BCR est mis en place avant la construction de la plate-forme, alors le revêtement pour la plinthe est placé contre les levées BCR, et le béton est projeté contre



Fig. 122
Protection en bois du revêtement PVC à Olivenhain, États-Unis, 2003

le revêtement synthétique. Encore une fois, l'emploi d'une géomembrane sacrifiée serait une précaution supplémentaire, mais cette solution n'a pas été adoptée jusqu'ici.

6.5.1.2. Installation postérieure

Le dispositif de géomembrane exposée peut également être installé après la construction du barrage. En ce cas, les profilés verticaux sont installés sur les levées BCR terminées, comme pour la réhabilitation des barrages en béton. Cette solution pourrait se développer considérablement dans l'avenir, et elle est d'ores et déjà considérée pour la réhabilitation de certains barrages BCR présentant des fuites. La mise en place du dispositif de géomembrane exposé après avoir terminé le barrage implique des coûts un peu plus élevés, car les éléments métalliques doivent être en acier inoxydable, les ancrages sont nécessaires et leur mise en place demande plus de temps qu'un simple noyage dans le béton frais.

6.5.2. Dispositif par géomembrane couverte

Le dispositif par géomembrane couverte n'est utilisable que pendant la construction d'un nouveau barrage BCR, et ne peut pas être mis en œuvre pour la réhabilitation. Dans ce dispositif, la géomembrane est noyée dans les panneaux de béton préfabriqués constituant le coffrage permanent pour la construction du barrage. La géomembrane est fixée en la noyant dans les panneaux pendant la préfabrication. Le béton des panneaux préfabriqués protège le revêtement de l'eau du réservoir.

Les panneaux sont conçus pour permettre un inter-verrouillage sans endommager le revêtement. Les dimensions courantes sont de 0,8 à 1,9 m (hauteur) × 3,0 à 5 m (longueur), 10 à 15 cm (épaisseur). La géomembrane imperméable est le plus souvent en PVC, soit en configuration nervurée (en général, une nervure de 15 mm de long tous les 150 mm), ou en configuration géocomposite utilisée pour la réhabilitation des barrages en béton. L'ancrage est effectué en noyant les nervures ou le géocomposite dans le béton des panneaux. L'utilisation d'une géomembrane à nervures n'est pas recommandée, car elle ne permet qu'une déformation réduite du revêtement, et son utilisation dans ce contexte a été interrompue par le fabricant qui l'avait inventée. Dans le cas d'un géocomposite, on place d'abord du béton frais dans le coffrage, avant de dérouler puis de vibrer le revêtement sur la surface de béton exposée du panneau, la face géotextile du matériau étant placée sur le béton frais. Le revêtement reste fixé sur le panneau grâce à la liaison assurée par l'absorption de la pâte de béton dans le géotextile. Cette méthode consistant à fixer le revêtement PVC sur les panneaux préfabriqués a été testé pour la première fois sur l'aménagement du barrage de Penn Forest (États-Unis, 1997) en arrachant plusieurs panneaux partiellement raccordés par des bandes de PVC soudées sur le matériau du revêtement de chaque panneau adjacent. Les essais destructifs ont démontré que les concentrations de contraintes dans le matériau PVC du revêtement ne se trouvaient pas sur les soudures entre les panneaux, mais étaient réparties sur le revêtement sur la plus grande partie de la surface du panneau. On a observé lors de l'arrachement des panneaux que la liaison entre le géotextile et le revêtement PVC avait rompu la première, en permettant au matériau du revêtement de jouer élastiquement et de s'étirer de plus de 50 cm aux joints avant de rompre. Cette méthode de fixation offre de nombreux avantages sur le dispositif

traditionnel d'ancrage en surface par des nervures en T, notamment : flexibilité améliorée, élongation supérieure du revêtement, et meilleure résistance aux concentrations de contrainte. Après Penn Forest, la méthode a été adoptée à Buckhorn, Hunting Run, North Fork Hughes River, Blalock, Hickory Log, Elkwater Fork (États-Unis), et Burnett River (Australie).

La surface support peut être le BCR des levées, ou un mélange type joint entre couches ou mélange béton (teneur en ciment élevée ou faible). La surface support, et les opérations de construction, notamment le compactage, sont les principales causes de dommages potentiels sur la couche d'étanchéité.

Le joint périphérique en pied et sur les appuis est en général fabriqué en noyant une bande de géomembrane dans le premier bloc du barrage, puis en la soudant de manière étanche avec la première rangée inférieure, ou la première rangée latérale des panneaux en béton.



Fig. 123
Essai destructif sur les panneaux
de Penn Forest

L'installation commence en plaçant la première rangée de panneaux au dessus du premier bloc, et en soudant aux panneaux la bande de géomembrane du premier bloc. Pour obtenir une étanchéité continue, tous les joints entre les panneaux sont étanchéifiés par des bandes de couverture PVC soudées sur le PVC des panneaux. La construction continue en mettant en place des rangées de panneaux superposés en suivant la montée du BCR. Les longueurs de soudure atteignent plusieurs kilomètres pour chaque barrage.

Les panneaux sont fixés au barrage par des ancrages étanches noyés dans le béton du barrage.

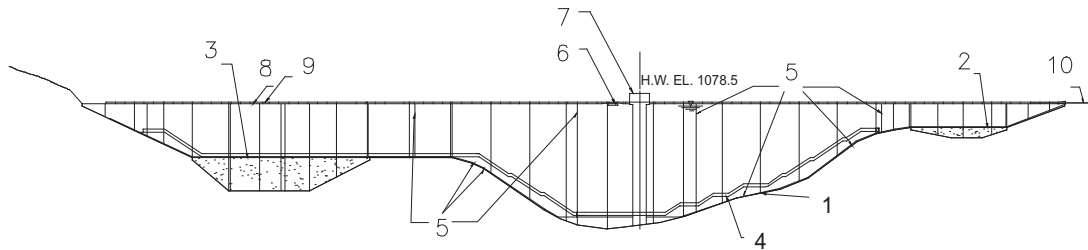
Le système couvert, qui est breveté, a été adopté principalement aux États-Unis. On note également des applications en Argentine, en Angola et en Turquie.

Dans un système couvert, les visites et réparations n'étant plus possibles après la construction du barrage, la face géomembrane du revêtement qui peut être endommagée pendant la construction doit être protégée. Cette protection est assurée par un contrôle qualité strict, et en insistant auprès des équipes de construction sur le fait que de bonnes procédures de construction sont cruciales pour la performance du revêtement. Un contrôle qualité de l'intégrité de la géomembrane et des soudures est essentiel, car aucune inspection de qualité ne pourra plus être faite après la mise en place du béton contre les panneaux.

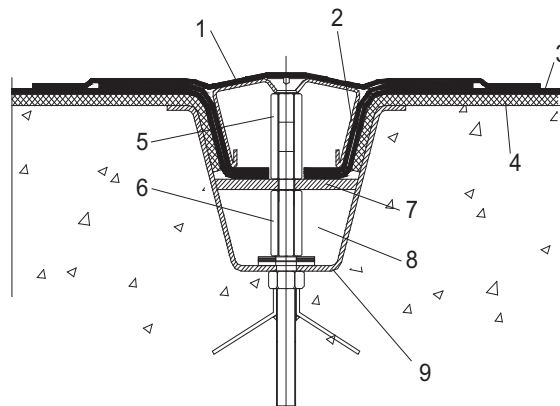
6.6. EXEMPLES TYPIQUES

6.6.1. Géomembrane PVC exposée installée après avoir terminé le barrage, géofilet sur tout le parement amont

Annexe 1 : Barrage de Olivenhain, États-Unis 2003



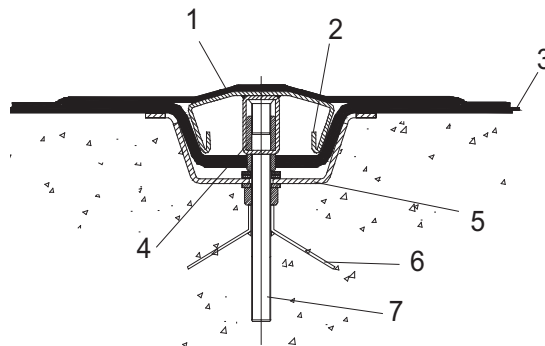
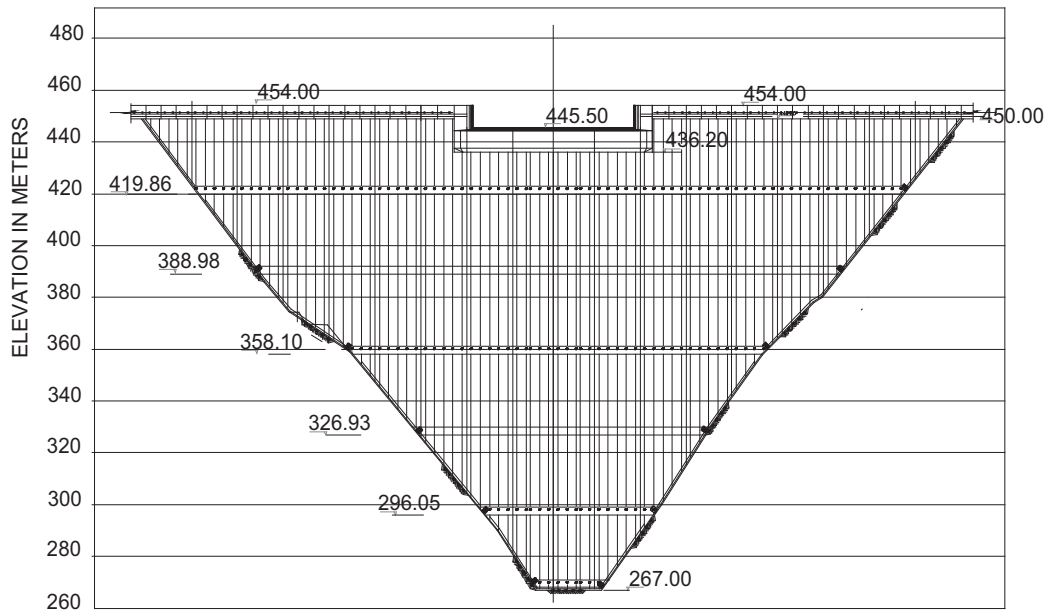
- | | |
|---|---|
| 1. Toit du rocher de fondation | 5. Pourtour du compartiment |
| 2. Sommet de la couche de forme de fondation
RD à El. 1025,0 | 6. Déversoir |
| 3. Sommet de la couche de forme de fondation
RG à El. 950,0 | 7. Tour de prise et d'évacuation |
| 4. Galerie | 8. Couronnement du barrage El. 1083,5 |
| | 9. Niveau du mur parapet El. 1087,0 |
| | 10. Axe de la route d'accès permanent existante |



- | | |
|--|---------------------------------|
| 1. Bande de couverture PVC (géomembrane PVC
2,5 mm) | 4. Géofilet |
| 2. Profilé de tensionnement en acier inoxydable
(breveté) | 5. Raccord supérieur |
| 3. Géocomposite PVC (géomembrane PVC
2,5 mm + géotextile 500 g/m ²) | 6. Raccord inférieur |
| | 7. Plaque de support |
| | 8. Canal de drainage |
| | 9. Profilé acier galvanisé noyé |

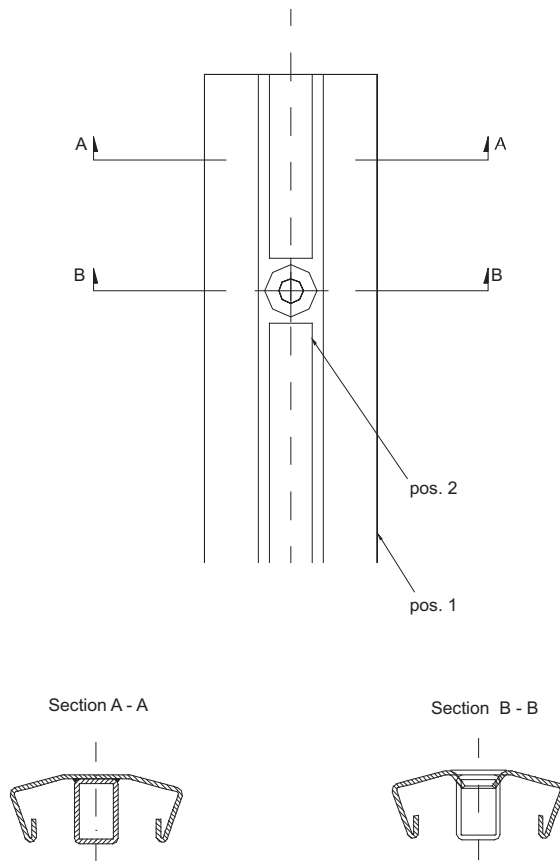
6.6.2. Géomembrane PVC exposée avec une épaisseur variable suivant la charge hydrostatique, installée pendant la construction du barrage

Annexe 1 : Barrage de Miel I, Colombie 2002



- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. Bande de couverture PVC (épaisseur 2,5 ou 3 mm en fonction de la profondeur) | 4. Élément de raccordement |
| 2. Profilé de tensionnement en acier inoxydable (breveté) | 5. Profilé en acier galvanisé noyé |
| 3. Géocomposite PVC (épaisseur de la géomembrane PVC 2,5 ou 3 mm en fonction de la profondeur) | 6. Ailes d'ancrage en acier galvanisé |
| | 7. Ancrage |

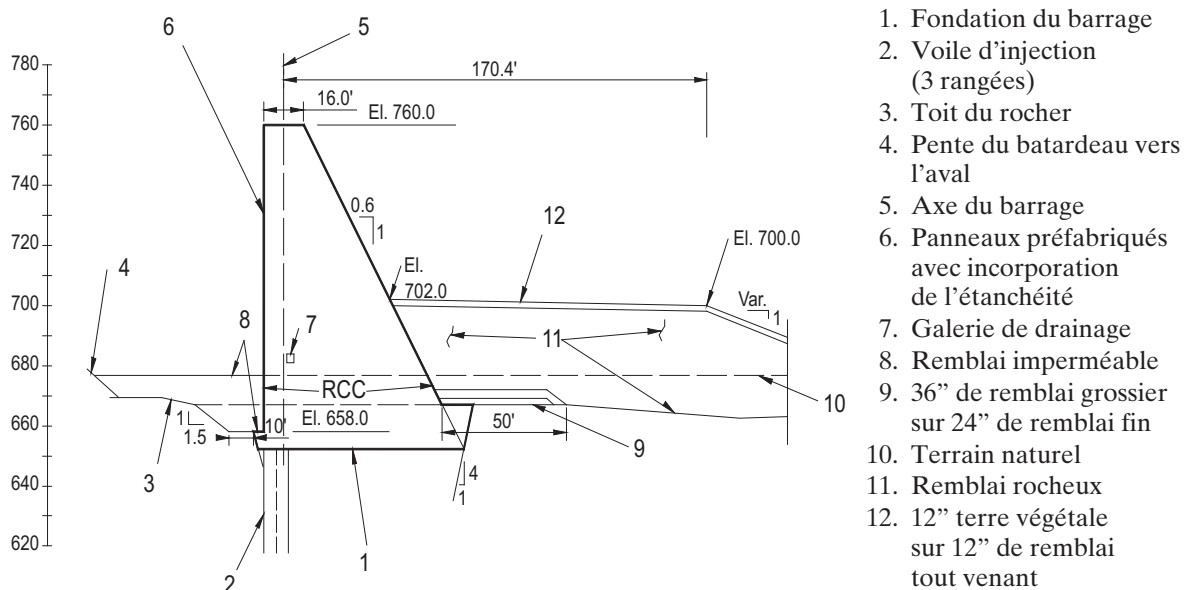
PROFILE RENFORCÉ



6.6.3. Géomembrane PVC couverte, partie intégrante des panneaux préfabriqués utilisés comme coffrage permanent pour la construction du barrage

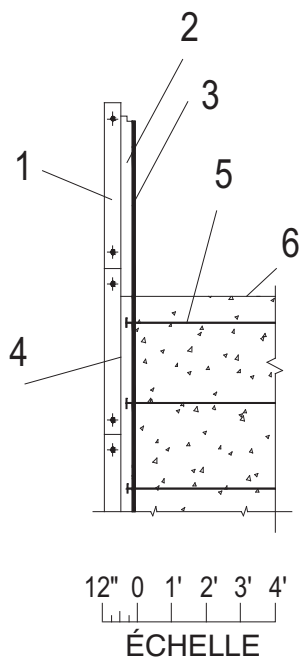
Annexe 1: Barrage de North Fork Hughes River, États-Unis 2001

SECTION TYPIQUE



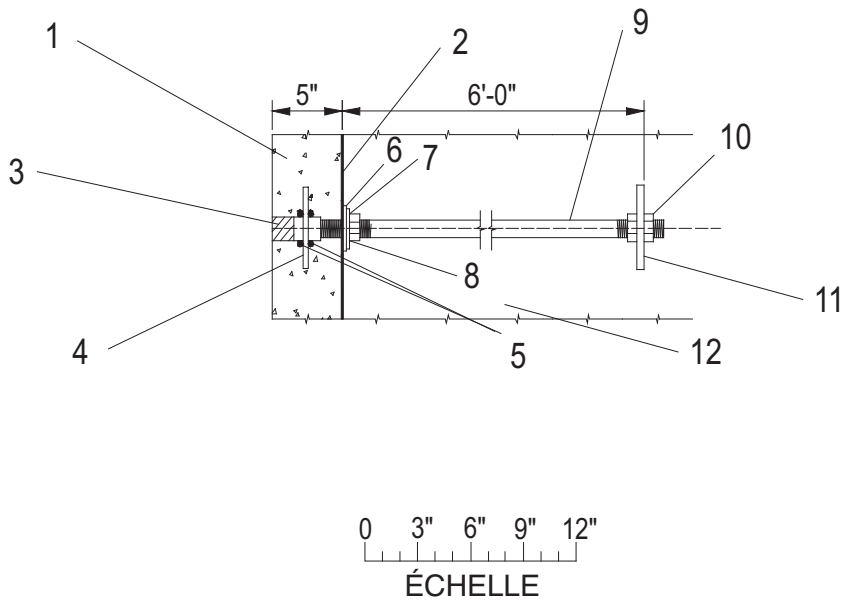
1. Fondation du barrage
2. Voile d'injection (3 rangées)
3. Toit du rocher
4. Pente du batardeau vers l'aval
5. Axe du barrage
6. Panneaux préfabriqués avec incorporation de l'étanchéité
7. Galerie de drainage
8. Remblai imperméable
9. 36" de remblai grossier sur 24" de remblai fin
10. Terrain naturel
11. Remblai rocheux
12. 12" terre végétale sur 12" de remblai tout venant

DÉTAIL DE MISE EN ŒUVRE



1. Piliers provisoires en acier haute résistance fixés aux panneaux à l'aide de boulons taraudés dans les inserts
2. Panneaux préfabriqués avec incorporation de l'étanchéité PVC (3)
3. Étanchéité PVC
4. Face amont du barrage
5. Tiges d'ancrage (4 par panneau)
6. Surface de la levée BCR

DÉTAIL DES BARRES D'ANCRAGE



- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Panneau en béton préfabriqué 2. Trous de fixation remplis d'un mortier sans retrait après installation du panneau 3. PVC géocomposite d'étanchéité (géomembrane PVC, 2 mm + géotextile 200 g/m²) 4. Plaque, acier galvanisé 3/8" × 4" × 4" 5. Soudure d'angle 1/4" de chaque côté 6. Joint caoutchouc | <ol style="list-style-type: none"> 7. Rondelle inox 8. Écrou inox 9. Longueur de tige fileté de 3/4" (acier galvanisé) 10. Écrou inox de chaque côté 11. Plaque en acier galvanisé, 6" × 6", ép. 3/8", percé 1/31/8" 12. Béton compacté au rouleau |
|--|--|

7. CAS SPÉCIAUX

Les cas spéciaux sont ceux pour lesquels le système de géomembrane a été utilisé pour réparer une zone limitée, ou pour lesquels la mise en œuvre s'est déroulée dans des conditions très inhabituelles.

Les cas particuliers incluent l'étanchéité des joints sur les masques en béton (barrages en béton, barrages en enrochements à masque amont en béton, barrages en BCR) pour la construction d'ouvrages neufs comme pour la réhabilitation et l'installation immergée.

7.1. GÉNÉRALITÉ

Dans la base de données, les cas particuliers sont les suivants.

Tableau 34
Cas particuliers

	Nouvel ouvrage	Réparation	Total
Béton	2	3	5
Barrage en BCR	3	3*	5
Barrage en enrochements à masque amont en béton	0	1	1
Autres barrages en remblai	2	3	5
Total	7	9	16

* Un dispositif réalisé sur ce même barrage déjà équipé d'une géomembrane (construction neuve).

Lors de la réparation de barrages en béton ou en BCR, des dispositifs de géomembranes ont été installés à sec et sous l'eau. Les mises en œuvre incluent la réparation des joints endommagés, l'installation de géomembranes élastiques permettant de rendre étanche le joint périphérique de pied, ainsi que la réparation des fissures. Dans toutes les mises en œuvre connues, la géomembrane a généralement été laissée exposée.

Dans les constructions d'ouvrages neufs, le même système a été adopté comme dispositif d'étanchéité externe pour les joints de dilatation verticaux dans les barrages en BCR, ou comme système de joints élastiques pré-formés dans les fondations des barrages-voûtes.

7.2. DISPOSITIF DESTINÉ À LA PRÉPARATION DES JOINTS ET FISSURES

7.2.1. Généralités

Des systèmes d'étanchéité partielle sont normalement utilisés pour rendre étanches des joints spécifiques, tels que les joints périphériques sur les barrages en béton (Kölnbrein, Autriche) ou les joints horizontaux sur les barrages en

enrochements à masque amont en béton, lorsque des fissures potentielles sont prévisibles (Karahnjukar, Islande). Ils sont également utilisés pour les joints dont l'étanchéité n'est plus parfaitement assurée (Vale do Rossim, Portugal), ou encore sur les fissures dans le béton ou dans les joints de construction des barrages BCR (Dona Francisca, Brésil). La conception et la construction des dispositifs d'étanchéité partiels dépendent des sites. Dans la plupart des cas, le système comprend un revêtement par géomembrane d'une largeur suffisante pour recouvrir le joint ou la fissure. La bande est fixée au parement béton du barrage par de simples dispositifs de serrage, c'est-à-dire que la géomembrane est serrée entre le parement béton et un plat en acier inoxydable, avec des joints plats pour répartir la pression. Dans le cas d'un masque en béton à la surface rugueuse, afin de permettre une distribution plus efficace de la pression, la surface est traitée avec de la résine époxy ou par meulage. Le plat en acier est ancré au masque en béton au moyen de tiges en acier inoxydable de fixation chimique ou mécanique. Quelques unes des dimensions les plus utilisées pour les plats en acier ou les ancrages figurent dans le Chapitre 5.

Le système habituellement adopté est le même que pour un dispositif de géomembrane utilisé pour la réhabilitation complète. En général, une couche support supplémentaire doit être ajoutée sous la géomembrane afin d'éviter la pénétration de celle-ci dans la fissure ou le joint sous la pression de l'eau. Le revêtement doit être de dimensions telles qu'il puisse recouvrir le joint ou la fissure jusqu'aux deux extrémités, sur une largeur d'au moins 0,5 m sur toute la longueur concernée. Dans le cas de fissures diffuses ou nervurées, la géomembrane doit être placée de sorte à recouvrir toute la surface concernée.

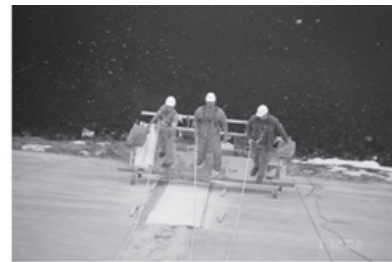


Fig. 124 et 125

Réparation d'un joint endommagé sur un barrage en enrochements à masque amont en béton avec une géomembrane en PVC exposée : Main Strawberry, États-Unis, 2002

Les aspects de l'aménagement et de l'installation sont proches de ceux décrits pour la réhabilitation d'un masque amont complet.

7.2.2. Support

La géomembrane doit être soutenue afin d'éviter la pénétration dans le joint ou la fissure sous la pression de l'eau. La pénétration pourrait créer des contraintes excessives, et provoquer la rupture de la géomembrane. Les couches support flexibles généralement utilisées comportent une ou plusieurs couches de géomembrane ou de géocomposite supplémentaire en fonction de la charge hydrostatique. Les géotextiles peuvent être utilisés pour le support, uniquement pour les charges très faibles. Pour des charges hydrostatiques élevées, ainsi que pour des ouvertures larges, des supports rigides seront efficaces. Des tests doivent être effectués afin de valider le concept avant son installation.

7.2.3. Ancrage

La nécessité d'ancrer les couches dépend des dimensions de la zone à couvrir. La géomembrane suit le chemin de la fissure sur une largeur totale ne dépassant généralement pas 1 m. L'ancrage périphérique peut suffire à fixer la géomembrane sur le masque. Si l'apparition de plusieurs fissures oblige à utiliser une largeur beaucoup plus importante de géomembrane, il peut être nécessaire de mettre en place des lignes d'ancrage intermédiaires.

En général, l'ancrage est assuré par un simple dispositif de serrage utilisant le même type de joint de compression que celui préconisé pour la réhabilitation totale. Autrement dit, la géomembrane est serrée entre la surface du barrage et les profilés en acier grâce à des joints d'étanchéité en caoutchouc, placés des deux côtés et permettant de répartir la pression. Le profilé de serrage est ancré au masque du barrage le long de la géomembrane au moyen d'ancrages chimiques ou mécaniques.

7.2.4. Fixation à la périphérie

La géomembrane est fixée sur toute la périphérie avec un dispositif de serrage. Sauf traitement adéquat, les fixations périphériques ne doivent pas être utilisées lorsque le béton n'est pas solide, ou en présence de fissures.

Aux endroits où les fixations périphériques pourraient être infiltrées par l'eau (ex. : au bas d'un joint, à l'interception avec un autre joint ou avec une autre fissure), il est fortement recommandé de prendre les mesures nécessaires afin de prévenir les fuites. En crête et en pied, cette mesure peut consister à raccorder la zone revêtue par la géomembrane à une tranchée, remplie de matériaux imperméables de type résine époxy ou coulis de béton. Au-dessus du parement, des injections dans des trous forés afin d'intercepter les chemins d'infiltration se sont avérées une méthode efficace. Il s'agit en effet d'une zone cruciale pour le bon comportement du système.

Il est essentiel de bien fixer la géomembrane le long de tous les contours, y compris en haut et en bas.



Fig. 126 et 127

Sans joint de pied, l'eau contourne la géomembrane qui est par ailleurs déchirée
(géomembrane EPDM à Scott's Peak, Australie)



Fig. 128 et 129

Avec un joint de pied étanche, l'eau ne peut pas s'infiltrer au dessous du DEG (géomembranes PVC à Vale do Rossim, Portugal, et à Platanovryssi, Grèce)

7.2.5. Couche de couverture

En général, une couverture n'est pas nécessaire sauf si la fissure s'étend vers une zone pouvant être exposée et s'il existe un risque sérieux de dégâts mécaniques causés par vandalisme ou d'autres facteurs. Afin de se prémunir contre de tels événements, une précaution supplémentaire peut être prise : une couverture sous forme de plaque en acier, de couche de béton ou de béton projeté peut être installée sur les zones horizontales vulnérables ou dans la zone de fluctuation du réservoir.

7.3. DISPOSITIF SUR JOINTS DE DILATATION INDUITS (BARRAGES BCR)

7.3.1. Généralités

La conception conventionnelle du système d'étanchéité pour les joints de dilatation verticaux sur barrages BCR est basée sur l'idée de prévoir de multiples lignes internes de défense contre l'infiltration de l'eau, au moyen de waterstops noyés. En général, une ligne de drains verticaux est créée derrière le waterstop afin de collecter les fuites potentielles. L'hypothèse est la suivante : les waterstops noyés dans le béton sont constitués de matériaux qui sont, en théorie, suffisamment déformables pour s'adapter et résister aux mouvements des joints. Si un waterstop venait à se rompre, il en resterait toujours un autre pour soutenir la charge. Le mouvement peut s'effectuer en trois dimensions avec l'ouverture/la fermeture du joint, la charge hydrostatique ou le cisaillement (dans le cas d'un tassement). Le plus souvent, la charge combine ces trois éléments.

Cette approche peut être contestée, sur la base des faits suivants : les waterstops noyés conventionnels ne permettent la déformation que dans la partie centrale du bulbe. L'expérience sur le terrain a démontré qu'ils ne s'adaptent pas toujours de manière efficace aux mouvements des joints en exploitation. Le waterstop est noyé dans les blocs avoisinants. La déformation maximale pouvant être supportée par le waterstop dépend de l'espace libre entre les blocs. Dans le cas de waterstops en PVC, l'approche théorique préconise un allongement maximal en termes d'absorption de 250 % de l'espace libre. L'expérience a prouvé que la déformation peut largement dépasser cette valeur. La contrainte que subit le waterstop peut donc être excessive. Par conséquent, il n'y a aucune garantie contre

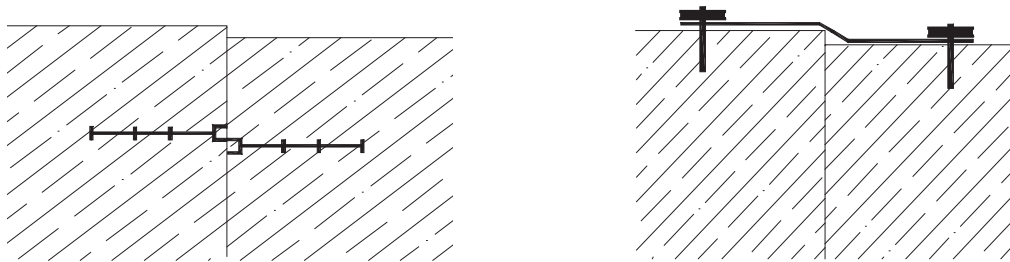


Fig. 130 et 131

Concept d'allongement dans les waterstops noyés et externes.

Si le cisaillement dépasse la capacité d'allongement du bulbe, le waterstop noyé se rompt

une rupture de la ligne de défense fournie par les waterstops, même si ces derniers sont nombreux. De plus, l'installation des waterstops est relativement compliquée au cours d'une opération hautement mécanisée, comme la mise en place et le compactage du BCR ainsi que divers mélanges du côté amont du barrage.

Le système de waterstop externe est un développement basé sur le concept adopté pour l'étanchéification de la totalité du barrage. Dans le système de géomembrane exposée, le côté amont du barrage est revêtu d'une géomembrane élastique et étanche, fixée le long du périmètre par un joint mécanique étanche. Pour les joints et les fissures, la géomembrane est installée par-dessus ces derniers en position exposée, pour former un waterstop externe. Pour le waterstop externe, la géomembrane étanche est généralement d'une largeur de 40 à 50 cm, et est ancrée de façon à pouvoir s'allonger sur toute sa largeur afin de suivre les mouvements du joint. Par exemple, un géocomposite en PVC présente un taux d'allongement à la rupture de 230 %, et le géotextile qui lui est attaché un taux d'environ 50 %. Par conséquent, une ouverture du joint de 20 à 25 cm est nécessaire avant de provoquer la rupture du géotextile. Si l'ouverture du joint est en dessous de 20 à 25 cm, la géomembrane restera étanche et élastique. Une ouverture de 90 à 115 cm provoquera la rupture de la géomembrane. Ces chiffres d'allongement pouvant être atteints par le waterstop externe sont d'un ordre de grandeur (cent centimètres) manifestement plus important que tout mouvement potentiel réaliste des joints. D'un autre côté, la déformation pouvant être supportée par un waterstop noyé traditionnel est essentiellement fondée sur les dimensions du bulbe central; par conséquent, les allongements pouvant survenir sont au minimum d'un ordre de grandeur inférieur à celui d'un waterstop externe avec géomembrane. C'est pourquoi les waterstops traditionnels, noyés dans le béton, ne se sont pas révélés efficaces sur le terrain, alors que les waterstops externes ont montré de bons résultats.

Les avantages des waterstops externes par rapport aux versions noyées peuvent se résumer comme suit dans le tableau 35.

Le système de géomembrane multicouche désormais breveté a été utilisé pour la construction d'ouvrages neufs (impermeabilisation de joints de contraction induits, sous la forme d'un waterstop externe) et la réhabilitation (impermeabilisation de joints endommagés et de fissures imprévues sur le masque amont, voir paragraphes précédents). Une installation immergée a également été faite pour réparer des fissures dans un barrage en BCR (Platanovyssi).

Pour la construction d'ouvrages neufs, le revêtement, en forme de bande et centré sur le joint, mesure généralement entre 40 et 50 cm et couvre le joint induit. En cas de fissure, le revêtement suit le chemin de celle-ci. Sa largeur et son ancrage

dépendent de la largeur de la fissure et de son étendue (diffuse ou non), comme décrit pour la réparation des barrages en béton.

Tableau 35
 Comparaison des waterstops noyés et externes sur les barrages BCR

Waterstop noyé conventionnel	Waterstop externe
L'allongement est fonction de l'espace libre entre les blocs (variations en millimètres)	L'allongement peut se faire librement sur la totalité de la largeur du waterstop (variations en centimètres)
L'installation doit se faire lors de la construction du barrage	L'installation n'intervient pas lors de la construction du barrage
Systèmes de drainage internes nécessaires	Système propre de drains sur le masque
Ne protège pas contre les infiltrations d'eau au pied du barrage	Étendu pour protéger contre les infiltrations d'eau au pied du barrage

7.3.2. Conception

Le waterstop externe fournit une ou plusieurs lignes de défense en position externe sur le masque amont du barrage. La configuration est la suivante :

Une couche support est placée sur la finition du masque amont dans la zone potentielle d'ouverture d'un joint ou d'une fissure. La couche support est conçue de manière à suivre l'ouverture/la fermeture du joint. La fonction de ce composant est de fournir un support suffisant au système d'imperméabilisation en cas d'ouverture maximale du joint et de charge hydrostatique maximale. Le support doit être souple afin de permettre la mobilité du joint.

La bande de géomembrane est placée sur le support et ancrée autour de ce dernier de manière indépendante. Ce composant est une géomembrane composite classique (géocomposite). Le géocomposite imperméabilisant est fixé pour couvrir le support et dépasse de 20 à 25 cm de chaque côté de la zone potentielle d'ouverture des joints. Il est ancré le long du périmètre par un joint étanche avec le même type de dispositif de serrage que celui décrit précédemment pour la réhabilitation de barrages en béton.

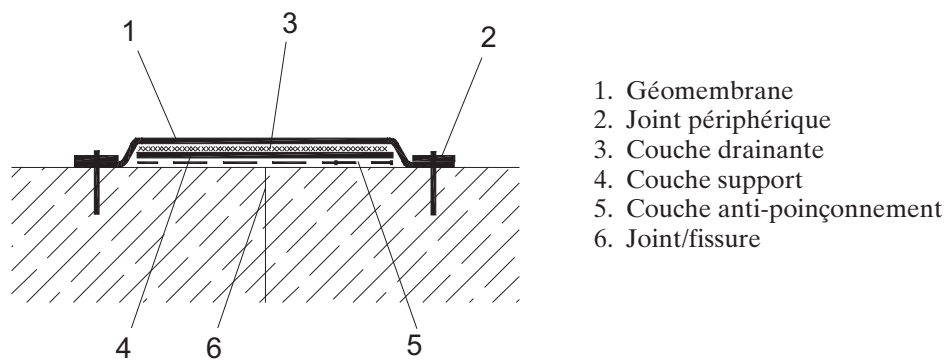


Fig. 132
 Schéma d'un waterstop externe

S'il est nécessaire de couvrir la géomembrane étanche, par exemple pour prévenir un éventuel vandalisme, une protection indépendante optionnelle peut être installée sur la zone en question. Le système de protection est conçu afin de pouvoir s'adapter à l'ouverture/la fermeture du joint. Cette protection est considérée comme secondaire, car elle ne participe pas à l'efficacité du système d'imperméabilisation. La protection peut être sous forme d'une plaque protectrice en acier ancrée sur la surface du barrage par-dessus la bande d'étanchéité.

Au pied amont ou à la périphérie du barrage, la géomembrane du waterstop fixée sur le masque doit être reliée à un système qui empêche l'eau de contourner les fixations périphériques et donc de s'infiltrer.

Pour la conception finale, il est fortement recommandé de vérifier la configuration de fixation prévue pour les systèmes de waterstops externes en effectuant une série de cycles de tests comprenant des tests de simulation à grande échelle en récipients pressurisés, dans les conditions suivantes : hauteur d'eau maximale couplée avec ouverture de joint anticipée maximale et coefficient de sécurité approprié. Les caractéristiques à tester sont :

- L'efficacité des joints périphériques étanches du système pour la charge appliquée (le système doit être étanche).
- L'efficacité du système d'imperméabilisation et de son support de part et d'autre du joint (le système doit résister à une charge hydrostatique maximale et à une ouverture maximale).

7.3.3. Préparation du support

La préparation du support est abordée dans les paragraphes précédents sur l'imperméabilisation de l'ensemble du barrage BCR. Le support contre la pénétration de la géomembrane dans le joint/la fissure est fonction de l'ouverture anticipée du joint/de la fissure et de la charge hydrostatique.

Généralement, un support rigide est fixé sur le joint dans les très hauts barrages. Au barrage de Platanovryssi (95 m, Grèce), le support est composé de couches supplémentaires de géotextile et de géocomposite fixées sur le béton qui comble l'entaille.

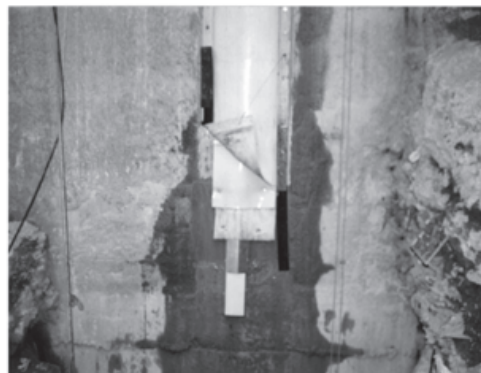


Fig. 133 et 134

Couches d'un waterstop externe à Platanovryssi, Grèce (à gauche), et Porce II, Colombie (à droite)

Au barrage de Porce II (118 m, Colombie), le support rigide est composé de deux plaques en acier inoxydable superposées. Afin de réduire les frottements, une bande de Téflon a été placée sur la zone de chevauchement des plaques en acier. Sur ce support rigide en acier, un support souple fournit une protection supplémentaire au revêtement d'étanchéité contre la pénétration et les dommages éventuels provoqués par la couche inférieure, et un faible frottement afin que le revêtement puisse s'allonger sur un joint actif de manière complètement indépendante du support. Le support souple est composé de géocomposites en PVC et/ou géotextiles épais sacrificiels, ce qui accroît la capacité de drainage.

Les diverses couches du support doivent dans tous les cas être ancrées de manière à pouvoir suivre les mouvements du joint librement et sans se gêner, car cette interférence pourrait réduire la capacité du système à suivre les mouvements et à maintenir l'étanchéité.

7.4. TYPE DE GÉOMEMBRANE

Les critères de sélection de la géomembrane sont les mêmes que ceux listés aux Chapitres 5 et 6. Ils reposent sur le choix de laisser exposée ou de couvrir la géomembrane.

Les conditions les plus importantes que la géomembrane doit remplir sont :

- Une durée de vie importante
- Une bonne élasticité (pour s'adapter aux mouvements et ouvertures)
- Une bonne résistance à la dislocation (pour colmater l'ouverture, mais un matériau de colmatage solide sous la géomembrane peut permettre une exigence moindre)
- Une bonne flexibilité (pour s'adapter à la couche support sur les joints périphériques étanches)
- Une certaine masse (une masse de géomembrane $> 1 \text{ g/cm}^3$ évite la flottabilité pour une installation immergée, augmentant ainsi le facteur de sécurité pendant l'opération et simplifiant la construction).

De la base de données :

Tableau 36
Types de géomembranes pour des applications particulières

	PVC	CSM	PELBD	Géomembrane <i>In situ</i>	TOTAL
Construction nouvelle, DEG exposé	3	0	0	0	3
Réhabilitation, DEG exposé	6*	1	0	1	7
Nouvelle construction, DEG couvert	1	1	1	0	3
Réhabilitation, DEG couvert	0	1	1	0	2
Inconnu	1	0	0	0	1
TOTAL	10	3	2	1	16

* Un dispositif réalisé sur le même barrage déjà équipé d'une géomembrane (construction neuve).

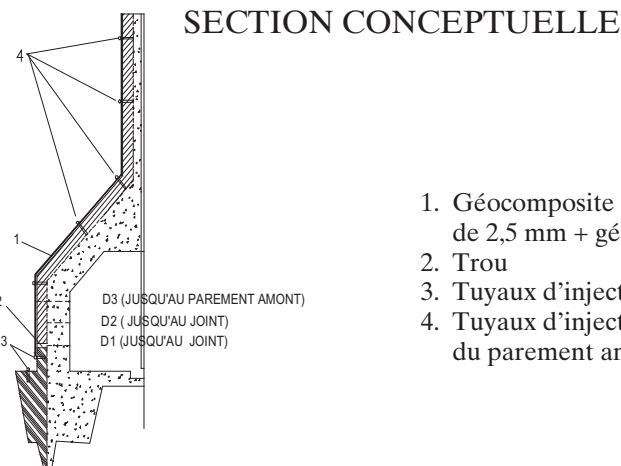
7.5. APPLICATIONS IMMERGÉES

Les diverses questions traitées dans le Chapitre 5 pour les installations immergées s'appliquent également aux joints et aux fissures. Le système d'étanchéification des fissures a été installé en immersion au barrage de Platanovryssi. En raison des dimensions généralement réduites de la géomembrane installée, la construction d'un cadre utilisé comme gabarit peut faciliter la pose correcte en immersion de la géomembrane.

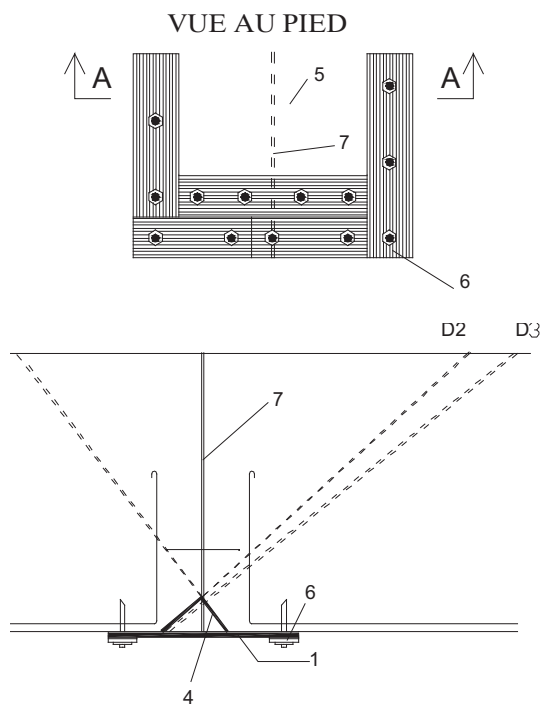
7.6. EXEMPLES TYPIQUES

7.6.1. Géomembrane PVC exposée pour la réparation de joints endommagés/fissurés

Annexe 1 : Barrage de Vale do Rossim (Portugal)



1. Géocomposite en PVC (géomembrane PVC de 2,5 mm + géotextile de 500 g/m²)
2. Trou
3. Tuyaux d'injection
4. Tuyaux d'injection espacés de 1,50 m du parement amont au waterstop

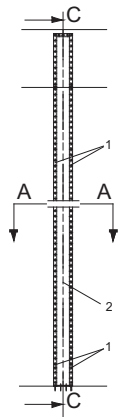
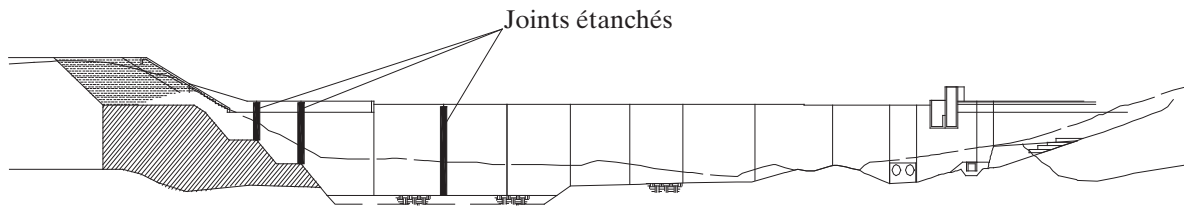


5. Béton
6. Joint périphérique étanche
7. Joint

1. Géocomposite PVC
4. Tuyaux d'injection espacés de 1,50 m du parement amont au waterstop
6. Joint périphérique étanche
7. Joint

7.6.2. Géomembrane PVC exposée sur les joints de contraction où des déplacements importants sont prévus

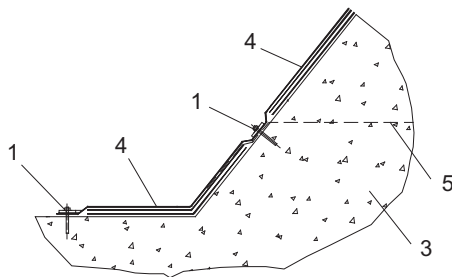
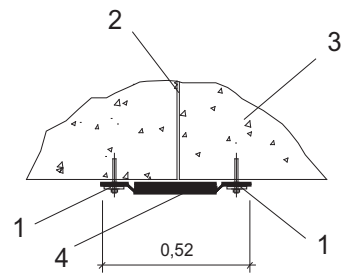
Annexe 1 : Déversoir principal du barrage de Eidsvold (Australie)



SECTION C - C

1. Joint périphérique
2. Joint
3. Béton
4. Géocomposite PVC (géomembrane PVC de 2,5 mm + géotextile de 500 g/m²)

SECTION A - A

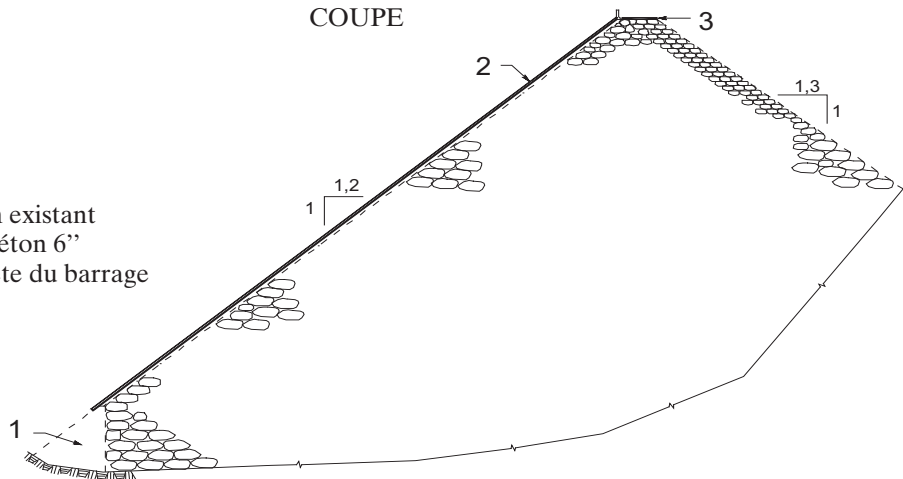


1. Joint périphérique
5. Waterstop
3. Béton
4. Géocomposite PVC

7.6.3. Géomembrane PVC exposée sur des joints fuyants

Annexe 1: barrage en enrochement à masque en béton de Main Strawberry (États-Unis)

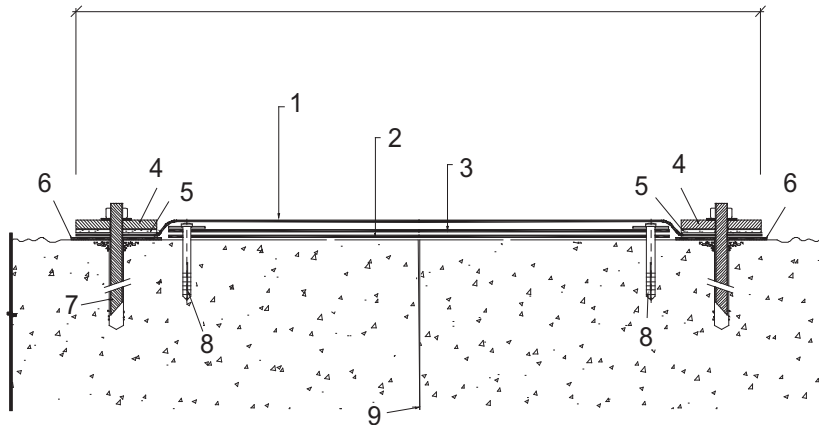
COUPE



1. Mur de pied en béton existant
2. Nouveau parement béton 6''
3. Dalle béton 4'' en crête du barrage

Coupe des réparations

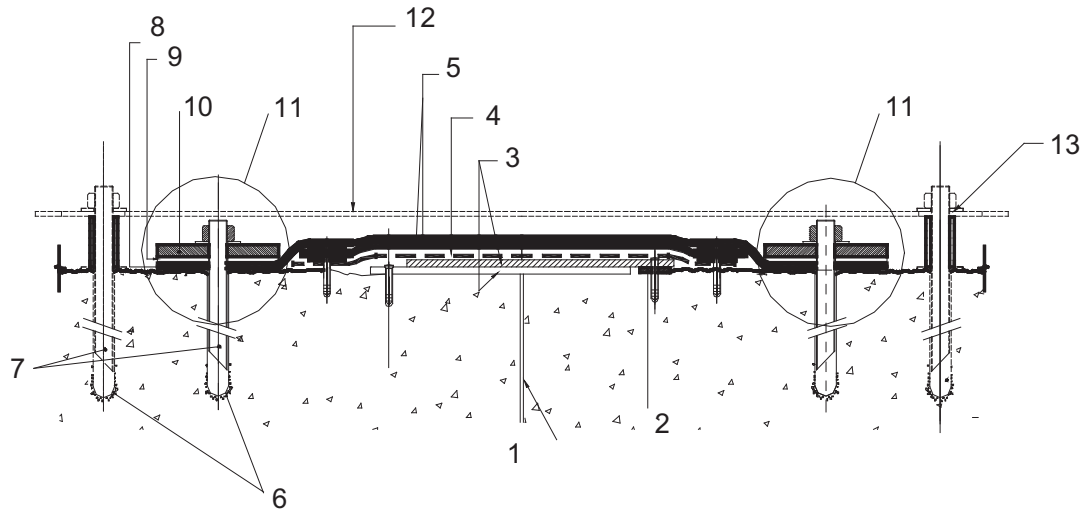
800 - 2000 mm



- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. Géocomposite en PVC (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile de 500 g/m ²) | 5. Joint |
| 2. 1 ^{re} couche support | 6. Couche de régularisation |
| 3. 2 ^e couche support | 7. Ancrage chimique |
| 4. Profilé en acier inoxydable | 8. Ancrage mécanique |
| | 9. Joint fuyant |

7.6.4. Géomembrane PVC exposée sur joints de dilatation dès la construction

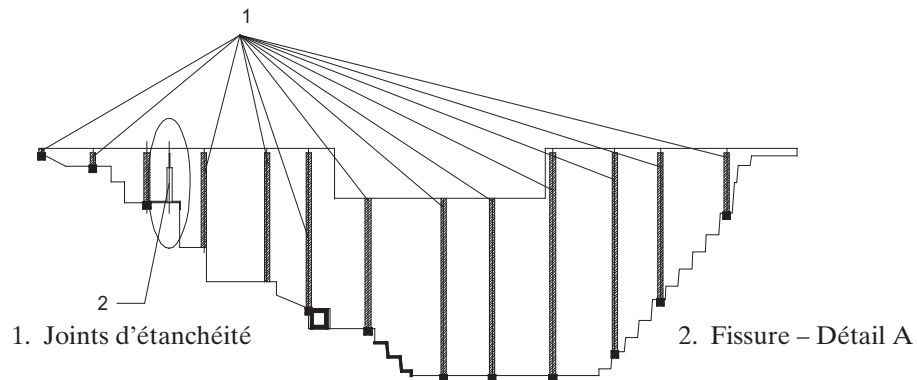
Annexe 1 : barrage de Porce II (Colombie)



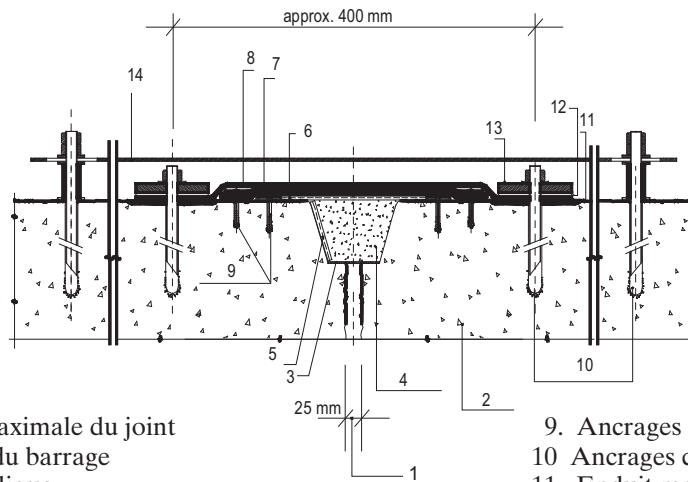
- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Joint de retrait (ouverture maxi. 25 mm) | 7. Tige filetée inox |
| 2. Écarteur inox | 8. Mortier epoxide |
| 3. Support glissant inox | 9. Joint caoutchouc |
| 4. Géotextile | 10. Profilé inox |
| 5. Géocomposite PVC étanche (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile 500 g/m ² , 2 couches) | 11. Joint étanche |
| 6. Ancrage chimique | 12. Plaque de protection inox |
| | 13. Saignée |

7.6.5. Installations à sec et immergées : géomembrane PVC exposée sur joints et fissure

Annexe 1 : barrage BRC de Platanovryssi (Grèce)

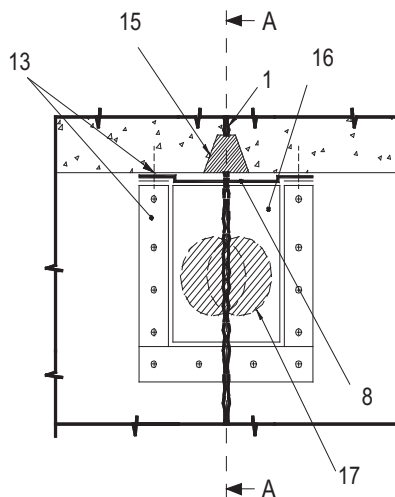


SECTION DU WATERSTOP EXTERNE SUR LES JOINTS DE CONSTRUCTION



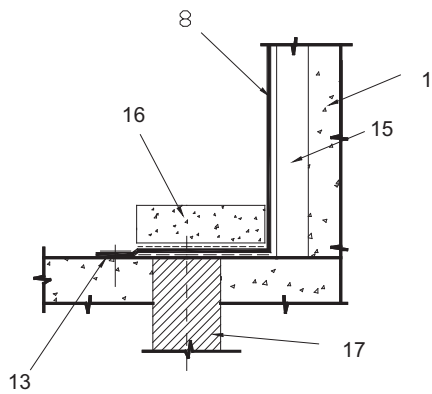
- | | |
|--|--|
| 1. Ouverture maximale du joint | 9. Ancrages dynamiques |
| 2. Béton BCR du barrage | 10. Ancrages chimiques |
| 3. Plaque métallique | 11. Enduit mortier |
| 4. Remplissage béton | 12. Joint caoutchouc |
| 5. Géotextile | 13. Étanchéité périmétrale - profilés inox |
| 6. Géotextile de transition et anti-poinçonnement | 14. Protection plaque inox (zone de fluctuation seulement) |
| 7. Géocomposite PVC pour support (2 plis) | |
| 8. Géocomposite PVC d'étanchéité (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile 500 g/m ²) | |

SECTION HORIZONTALE

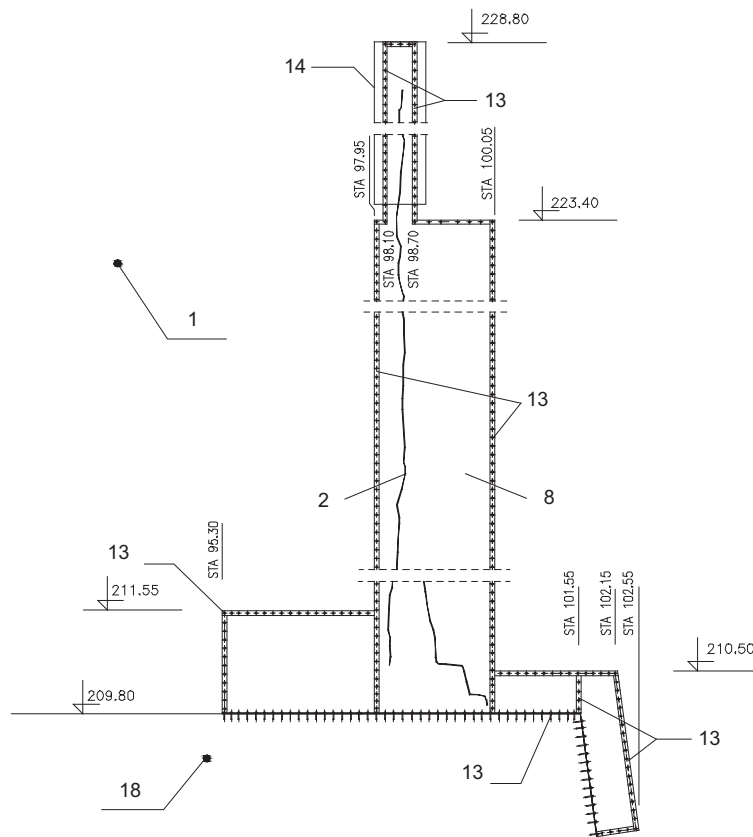


- | |
|---|
| 1. Joint de dilatation |
| 15. Entaille |
| 8. Géocomposite PVC (géomembrane PVC 2,5 mm + géotextile 500 g/m ²) |
| 13. Ancrage périphérique étanche |
| 16. Lest en béton |
| 17. Injection |

SECTION A - A



- 1. Joint de contraction
- 15. Entaille
- 8. Géocomposite PVC
- 13. Ancrage périphérique étanche
- 16. Lest en béton
- 17. Injection



DÉTAIL A - VUE DE LA FACE AMONT AVEC FISSURE

- 1. Parement amont du barrage BCR
- 2. Fissure
- 8. Géocomposite PVC d'étanchéité
- 13. Ancrage périphérique étanche
- 14. Plaque de protection
(zone de fluctuation seulement)
- 18. Plinthe béton

8. CONTRÔLE QUALITÉ D'UN DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE

8.1. INTRODUCTION

Les deux étapes de conception et de construction sont étroitement liées et les problèmes de l'installation seront mieux traités s'ils sont pris en compte lors de la phase de conception du Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane et de la structure même : analyse fonctionnelle, sélection de la géomembrane, calcul des autres éléments du DEG, inclinaison des parements, etc.

La recherche de la qualité dans les travaux d'imperméabilisation des barrages est indispensable. Sont en jeu la sûreté de la structure, le capital investi, le coût de réparation de la géomembrane, en particulier si celle-ci est équipée d'une couche protectrice. La qualité de la construction du DEG assure, en terme d'étanchéité, le fonctionnement requis et la durée de vie escomptée. La bonne exécution des ouvrages et la précision de la pose et du soudage constituent un important facteur de réussite. Tout ceci peut être obtenu grâce à des soudeurs et des installateurs qualifiés et expérimentés. Des certifications pour des produits et pour le métier de soudeur sont accordées dans plusieurs pays.

La coordination de la préparation de la couche support et de la couche de couverture doit être assurée pour certains points soigneusement sélectionnés et être incluse dans le plan général de l'assurance qualité.

8.2. CONTRÔLE QUALITÉ ET ASSURANCE QUALITÉ

Les dispositifs d'étanchéité par géomembranes peuvent être contrôlés afin de vérifier leur étanchéité. Le contrôle qualité du dispositif d'étanchéité après installation et avant le remplissage du réservoir est composé de deux étapes :

- Fabrication (F)
- Construction (C)

et concerne aussi bien le contrôle qualité (CQ) que l'assurance qualité (AQ).

Il est important de définir et de comprendre les différences entre CQF et AQF et entre CQC et AQC et de souligner le contraste entre les différentes activités et/ou leur complémentarité. En voici les définitions :

- Contrôle Qualité Fabrication (CQF) : système planifié d'inspections mis en œuvre pour la surveillance et le contrôle directs de la fabrication en usine de matériaux. Le CQF est normalement effectué par le fabricant de matériaux géosynthétiques et est nécessaire pour assurer les valeurs minimales ou maximales indiquées sur le produit fabriqué. Le CQF se réfère à des mesures prises par le fabricant afin de déterminer la conformité aux normes pour les matériaux et la qualité du travail, comme indiqué dans les documents de certification et les plans et spécifications du contrat.

- Assurance Qualité Fabrication (AQF) : système planifié d'activités assurant la conformité de la fabrication des matériaux aux documents de certification et aux plans et spécifications du contrat. L'AQF inclut les inspections des installations de fabrication, les vérifications, audits et évaluations des matières premières et des produits géosynthétiques afin d'évaluer la qualité des produits fabriqués. L'AQF se réfère aux mesures prises par l'organisme d'AQF afin de déterminer si le fabricant ou l'intermédiaire respecte la certification du produit et les plans et spécifications du contrat liés au projet.
- Contrôle Qualité Construction (CQC) : système planifié d'inspections utilisé pour la surveillance et le contrôle directs de la qualité du projet de construction. Le contrôle qualité construction est normalement effectué par l'installateur de géosynthétiques pour assurer une qualité optimale du système construit ou installé. Le contrôle qualité construction (CQC) se réfère aux mesures prises par l'installateur ou l'entrepreneur pour déterminer la conformité aux normes des matériaux et la qualité du travail, conformément à ce qui est indiqué dans les plans et spécifications du projet.
- Assurance Qualité Construction (AQC) : système planifié d'activités assurant que l'installation a bien été construite selon les modalités de conception. L'assurance qualité construction inclut les inspections, vérifications, audits et évaluations des matériaux et de la qualité du travail nécessaires pour déterminer la qualité de l'installation construite et documenter cet aspect. L'assurance qualité construction (AQC) se réfère aux mesures prises par l'organisme d'AQC afin d'évaluer si l'installateur ou l'entrepreneur respecte les plans et spécifications du projet.

L'AQF et l'AQC sont effectués indépendamment du CQF et du CQC. Bien que l'AQF/le AQC et le CQF/CQC soient des activités séparées, leurs objectifs sont similaires et, pour un projet construction en bonne marche, les processus se compléteront entre eux. Inversement, un programme AQF/AQC peut conduire à l'identification des failles dans le processus CQF/CQC, mais le programme AQF/AQC en lui-même (en absence totale de programme CQF/CQC) ne mènera probablement pas à une gestion de qualité acceptable. La qualité est assurée au mieux par des programmes CQF/CQC et AQF/AQC efficaces et s'applique à la fois aux géosynthétiques et matériaux issus du sol naturel, puisque tous deux nécessitent une attention et un traitement particuliers.

Le bon fonctionnement souhaité d'une géomembrane ou d'un dispositif géosynthétique similaire dans une installation construite est fortement dépendant des CQF/AQF de son usine de fabrication et du CQC/de l'AQC de son installation. Les géosynthétiques sont des matériaux relativement nouveaux comparés à l'acier, au béton, au bois de construction, etc., et chaque détail doit être pris en compte afin de prévenir les défaillances. De telles défaillances sont tout simplement inacceptables quel que soit le moment auquel elles surviennent pendant la durée de vie prévue du dispositif. Une bonne prise en compte des CQF/AQF et CQC/AQC permettra de donner aux géomembranes (et à tous les types de géosynthétiques) la place qu'ils méritent parmi les matériaux d'équipement sûrs pour l'avenir.

La qualité du dispositif d'étanchéité peut être contrôlée pendant toute sa durée de vie. Pendant la première mise en eau, le débit du drainage doit être surveillé de manière continue, et les valeurs doivent être correctement interprétées lorsque le niveau du

réservoir augmente. Le contrôle du débit du drainage doit continuer pendant la vie opérationnelle de la structure, de manière à ce que toute variation du débit normal du drainage signale un possible fonctionnement anormal du système. Une inspection visuelle et des systèmes de détection des fuites peuvent repérer les éventuels dommages.

8.3. ÉLÉMENTS DU CQF

Cette étape de la qualité inclut :

- Le CQ des matériaux lors de la fabrication et de l'emballage
- La préfabrication des panneaux de géomembrane, le cas échéant.

Aujourd'hui, les géomembranes sont la plupart du temps fabriquées selon les procédures de normalisation et de certification, notamment ISO 9000. Ces procédures garantissent une qualité constante du produit, qui est contrôlé et vérifié à toutes les étapes de sa production. Les procédures d'étiquetage et d'emballage permettent une identification et une traçabilité totales de chaque rouleau de géomembrane comme décrit au Chapitre 2.

Le fabricant certifie les propriétés de la géomembrane et fournit toutes les autres certifications requises dans les spécifications. Le fait que les spécifications requièrent l'intervention d'un laboratoire indépendant pour des tests et certifications sur les propriétés de la géomembrane fournie, est passé dans la pratique courante. Le nombre de certifications est spécifique au site puisque le coût et la durée des tests peuvent être importants. Au moins une certification complète pour chaque lot de géomembrane fourni est requise.

D'autres composants du dispositif d'étanchéité, comme les articles métalliques, les résines, les matériaux géosynthétiques, etc., sont généralement emballés dans des paquets et marqués selon les procédures internes du fabricant. Aucun test supplémentaire n'est généralement requis pour ces composants.

Comme les lés de géomembranes sont parfois fournis sous la forme de rouleaux plus grands, la préfabrication par un intermédiaire ou l'entrepreneur chargé de l'étanchéité doit être exécutée dans un parc spécialement destiné à la préfabrication, par une équipe ayant le même niveau de qualifications que celle du personnel employé sur site. Chaque panneau préfabriqué doit comporter une étiquette afin de permettre son identification sur site et la traçabilité des rouleaux qui ont été assemblés.

8.4. PROCÉDURES POUR ASSURER LE MAINTIEN EN BON ÉTAT DE LA GÉOMEMBRANE

Pour assurer le bon fonctionnement de tout dispositif d'étanchéité par géomembrane, cette dernière doit pouvoir résister aux phases d'emballage, de transport, de manipulation et aux contraintes d'installation qu'elle subit. On ne peut prendre à la légère cet aspect de la conception ni considérer qu'il se fera de lui-même. Voici les paramètres qui jouent un rôle important :

- Stockage en usine
- Manipulation en usine
- Transport depuis l'usine jusqu'au site de construction

- Déchargement sur le site
- Conditions de stockage sur le site
- Températures extrêmes sur le site
- État de la couche support sur le site
- Mise en place provisoire
- Ajustement de position pour le soudage
- Traitement sur site pendant le soudage
- Exposition sur site après soudage
- Apport d'un matériau de protection ou de terre de remblai sur la géomembrane achevée le cas échéant.

Avec un document d'assurance qualité construction (AQC) bien planifié, une inspection permanente effectuée par le personnel AQC et la coopération de l'entrepreneur de l'installation, la géomembrane sera maintenue en parfait état pour être utilisée aux fins pour lesquelles elle a été conçue.

Pendant le stockage, le transport, la manipulation et l'installation, les géomembranes sont souvent vulnérables aux déchirures, poinçonnements et impacts. Ceci arrive souvent par accident, par vandalisme ou en raison d'une malfaçon. Situations les plus fréquentes : outils tombant sur la géomembrane, voitures ou camions roulant sur le revêtement non protégé, vents forts s'engouffrant sous la géomembrane lorsque celle-ci est installée, difficulté à manier de grandes nappes de géomembrane, etc. La résistance ou le risque de déchirement, de poinçonnement et de dégâts causés par un choc, dépendent principalement de l'épaisseur de la géomembrane. L'augmentation de l'épaisseur entraîne obligatoirement une croissance linéaire de la résistance aux phénomènes précédemment cités, voire une croissance exponentielle. Pour les barrages de charge hydrostatique inférieure ou égale à 60 m, les épaisseurs des géomembranes thermoplastiques figurant dans la base de données et qui sont les plus utilisées s'élèvent à 2,0 et 2,5 mm, et jusqu'à 3,0 et 3,5 mm pour quelques barrages à hauteur de charge hydrostatique supérieure à 60 m. Il est important de noter que la résistance au déchirement, aux perforations et aux impacts dépend à la fois des propriétés de la géomembrane (de l'épaisseur en premier lieu), de la régularité du parement sur lequel repose la géomembrane et enfin de la charge hydrostatique. Par conséquent, l'épaisseur minimum utilisée et les propriétés qui en découlent doivent être adaptées aux conditions spécifiques du site, et non suivre une seule valeur imposée par les normes. À cet effet, des indications spécifiques sur les géomembranes en PVC-P utilisées dans les installations hydrauliques figurent dans le Tableau 37. Les spécifications pour les autres géomembranes destinées à des usages variés sont en cours d'élaboration.

8.5. CONTRÔLE QUALITÉ-CONSTRUCTION

Cette étape de la qualité inclut :

- Réception du matériel sur le site
- Réception du parement
- Installation du géotextile soutenant la géomembrane
- Installation des lés/panneaux de la géomembrane

- Installation du système de fixation sur le parement amont le cas échéant
- Joints effectués sur site pour les lés/panneaux de la géomembrane
- Étanchéité des joints périphériques
- Inspection finale de la géomembrane
- Mise en place de la couche de couverture le cas échéant
- Inspection finale du système d'étanchéité par géomembrane (après la mise en place de la couche de couverture).

L'entreprise installant le système d'étanchéité fournit le manuel d'assurance qualité relatif à l'installation de tels systèmes avant d'entamer les travaux, de familiariser tous les acteurs du chantier et de les sensibiliser aux interactions qui peuvent exister entre les différentes étapes de la construction. Le manuel d'assurance qualité indique les procédures d'installation et d'inspection, le niveau de tolérance, les normes et procédures de vérification ainsi que les moyens pour corriger les écarts et inclut les formulaires attestant de toutes les étapes suivies pour le contrôle qualité. Selon le mode d'organisation des travaux, certaines des étapes ci-dessus peuvent être effectuées et immédiatement reportées dans le manuel.

8.5.1. Réception des matériaux sur site

Tous les matériaux sont livrés sur le site avec la documentation correspondante décrivant leurs caractéristiques. Le contrôle qualité effectue une vérification des étiquettes pour s'assurer que les matériaux correspondent aux spécifications données et sont prêts à être installés. C'est généralement durant cette étape qu'un prélèvement des matériaux de la géomembrane est effectué pour tester leur conformité. En cas de tests de longue durée, il est préférable d'effectuer le prélèvement plus tôt, juste après la fabrication. Cela permet d'apporter les rectifications éventuelles aux produits très en amont. Le transport en général n'affecte pas les caractéristiques de la géomembrane, sauf événements exceptionnels qui seraient à coup sûr détectés.

Tableau 37
Nombre d'échantillons devant être prélevés et testés

Valeur de S	$S < S1$	$S1 < S < S2$	$S > S2$
Nombre de tests	0	1	$1 + (S - S2)/(2 \times S2)$

S = Superficie totale du système d'étanchéité
S1 et S2 = Valeurs du Tableau 38

Tableau 38
Valeurs de S1 et S2 pour le Tableau 37

Valeur de S1 et S2	Produits certifiés	S1 [m ²]	S2 [m ²]
Géotextiles et géofilets	OUI	5 000	30 000
Géotextiles et géofilets	NON	1 000	5 000
Géomembrane	OUI	4 000	25 000
Géomembrane	NON	1 000	4 000

Pour tous les géotextiles : masse surfacique, poinçonnement statique, traction bi-directionnelle.

Pour le géotextile utilisé sur des pentes au-dessus de la géomembrane : masse surfacique, traction longitudinale, permittivité, transmissivité.

Pour les géomembranes : liste des tests spécifiés par les études. Ils concernent généralement toutes les caractéristiques de la géomembrane.

Plusieurs normes internationales permettent de définir les critères d'acceptation, les écarts ainsi que les actions correctives. Ces éléments doivent figurer dans les études.

Les aires de stockage sont surveillées voire couvertes lorsque les conditions du site l'exigent, en particulier si le projet vient à être retardé et que la géomembrane est susceptible d'être entreposée pour une longue durée. Ceci est valable principalement pour les géomembranes, les géotextiles et géofilettes devant être enterrés et dont la résistance aux UV n'a pas été spécifiée.

L'aire de stockage et la route qui y mène doivent être faciles d'accès quelles que soient les conditions météorologiques, et doivent être conçues pour pouvoir supporter les charges en question. Les matériaux géosynthétiques arrivent en rouleaux et sous emballage. Les étiquettes correspondant à la certification doivent toujours être visibles sur l'emballage et sur le rouleau. Les dégâts causés pendant le transport et le stockage doivent être évités.

8.5.2. Réception de la couche support

L'acceptation de la couche support inclut le cas échéant :

- La rugosité du revêtement achevé,
- La vérification de la bonne installation et de la fonctionnalité des éléments noyés tels que les profilés d'ancrage, les conduites d'évacuation et de contrôle et les autres systèmes de contrôle,
- La vérification du système anti-pénétration au niveau des joints.

Les critères d'acceptation sont établis lors des études.

Les inspections et réparations, effectuées si nécessaire conformément au manuel d'assurance qualité, sont consignées par écrit.

Cette étape peut signifier un POINT D'ARRÊT des travaux, qui ne peuvent se poursuivre si tous les paramètres ne sont pas respectés.

La surface support doit être nette et exempte de tout élément agressif (cailloux pointus, tiges métalliques, etc.) susceptible de nuire au bon fonctionnement et à la durabilité du DEG, par exemple par déchirement de la géomembrane ou du géotextile au contact d'arêtes tranchantes lors de l'installation et/ou de l'exploitation. Le compactage et la capacité portante doivent être définis lors de la conception et contrôlés sur le chantier avec des méthodes adaptées. Ce contrôle est relativement important dans les zones soumises au passage de véhicules lors de la construction, ceux-ci ne devant pas creuser d'ornières de plus de quelques centimètres. Les autres zones sensibles sont celles où la mise en place de la structure support est délicate, par exemple la mise en place de terre près des ouvrages en

béton de type caniveaux et tours de prise d'eau, où l'on utilisera des compacteurs vibrants plus petits. Cette terre pourra être placée sur une couche de béton maigre afin de pallier le problème de tassement différentiel localisé et donc d'altération supplémentaire du raccordement du DEG à l'ouvrage en béton rigide.

Avant l'installation du DEG, la planéité de la couche support doit être mesurée. Certains manuels de contrôle qualité suggèrent des défauts de forme d'amplitude maximale 3 cm sur une longueur de 4 m. Ces valeurs peuvent être revues à la hausse en cas d'utilisation d'une géomembrane épaisse mais souple.

Pour les zones de transition géométriques (versant/versant, versant/pied, versant/crête) on utilisera un rayon de courbure minimal de 30/50 cm. En général, les géomembranes doivent toujours être planes et entièrement au contact de la couche support lors de l'installation et du fonctionnement.

Si le parement est constitué de matériaux très sensibles à l'érosion, il est recommandé de le stabiliser en le traitant avec du ciment, du béton projeté, une émulsion bitumineuse, etc. Il est également possible d'ajouter une couche de sable ou de grave-ciment mélangée dans une centrale. L'utilisation de béton poreux extrudé mentionné au Chapitre 4 pour la construction du parement amont des barrages en enrochement est une option envisageable.

Les éléments noyés au béton tels que les profilés en acier pour l'ancrage linéaire de la géomembrane ou les profilés synthétiques pour la construction des joints périphériques doivent être vérifiés au niveau de l'ancrage, de l'alignement, de l'assemblage, etc.

Le système de drainage doit être vérifié : l'écoulement de l'eau doit être libre, avec une pente adaptée et sans aucune obstruction.

Les systèmes anti-pénétration pour les joints doivent être vérifiés : les couches doivent être correctement ordonnées et les points d'ancrage bien positionnés, ceux-ci ne devant pas endommager la géomembrane ou interférer avec ses mouvements.

8.5.3. Installation du géotextile

Sauf utilisation d'un géocomposite (géomembrane pré-assemblée à un géotextile lors de la fabrication), un géotextile ou un géofilet sont généralement placés sous la géomembrane en guise de support. Une fois la géomembrane installée, faire attention à :

- Ne pas endommager la surface support
- Recouvrir ou assembler correctement les panneaux; en général, un recouvrement simple (> 20 cm) avec ou sans soudure suffit. Les raccordements horizontaux le long de la pente sont interdits, sauf si une liaison mécanique à haute résistance (soudure ou couture) est réalisée.
- Laisser en place le lest provisoire jusqu'à ce que la géomembrane soit installée
- Appliquer les mêmes instructions et dimensions pour le raccordement aux ouvrages de béton.

Le contrôle qualité vérifie que le recouvrement minimum est respecté, et que les joints et les soudures, lorsqu'ils sont nécessaires, sont correctement réalisés.

8.5.4. Installation des lés/panneaux de la géomembrane

L'installation se fait dans des conditions climatiques approuvées par l'entreprise installant le système d'étanchéité. Le contrôle qualité vérifie que l'installation des lés suit bien le schéma d'installation, et que celles-ci ne présentent aucun défaut. Cette étape est documentée. Dans certains cas, le contrôle qualité s'assure également des conditions météorologiques au moment de la pose des lés.

Le schéma d'installation des lés dépend de la géométrie de la structure, du type de géomembrane et de l'équipement utilisés. Il permet à l'entrepreneur d'optimiser ses travaux d'installation, en minimisant le recouvrement, le gaspillage et les opérations de soudure, en facilitant la manipulation des rouleaux. En résumé, cela l'aide à obtenir une qualité supérieure.

Selon leur taille et leur poids, les rouleaux sont déplacés et installés pour être déroulés, si nécessaire grâce à des équipements spécialement conçus. Les opérations de déroulement doivent être réduites à leur minimum, afin d'éviter d'endommager le parement et la géomembrane.

Les rouleaux sont déroulés suivant la plus ligne de plus grande pente. Le recouvrement longitudinal des rouleaux ne doit pas se faire à l'horizontale, sauf cas particuliers sur les risbermes ou pentes peu accentuées. Habituellement les rouleaux sont déroulés de la crête vers le pied pour éviter d'endommager le support (barrages en terre).

Afin d'éviter toute détérioration, principalement celles causées par le vent, les panneaux de la géomembrane doivent être temporairement lestés par des sacs de sable ou équivalents après leur installation, jusqu'à ce qu'ils soient recouverts par une couche de couverture (cas typique dans la construction des nouveaux barrages en terre), soit immédiatement fixés dans le cas d'un ancrage mécanique (cas typique de la réhabilitation).

De nombreuses géomembranes, et tout spécialement celles en PEHD, ont un coefficient de dilatation thermique significatif, ce qui entraîne la formation de plis (par temps chaud) ou de surfaces trop tendues (par temps froid). Ce phénomène doit être soigneusement étudié avant de :

- réaliser les soudures ; les côtés des deux rouleaux à assembler doivent être à la même température afin d'éviter un retrait différentiel, l'apparition de plis et de rides supplémentaires après la soudure ;
- raccorder la géomembrane à la structure de béton, de manière à ce qu'elle ne soit que faiblement tendue ;
- obtenir un contact étroit et plan en pied lorsque le DEG sera en service ou au moment de mettre en place la couche supérieure, afin d'éviter tout éclatement ou déchirement ;
- positionner correctement la couche de couverture, le phénomène de plis et rides sur une géomembrane en PEHD étant accentué par la couleur noire, plus sensible à la chaleur du soleil. Dans le cas des géomembranes en PEHD, il est assez commun de voir se former des ondulations de 10/25 cm de hauteur qui deviennent extrêmement dangereuses au moment de l'installation d'une couche de couverture, par exemple une couche de béton épaisse de 10/15 cm. La hauteur des ondulations ne doit pas dépasser 10 % de l'épaisseur de la

couche de couverture. Il ne faut en aucun cas aplanir les ondulations lors de la mise en place de la couche de couverture, car la contrainte induite par le pli peut affecter localement la durabilité de la géomembrane. Une géomembrane présentant un coefficient de dilatation thermique beaucoup moins élevé (par exemple une géomembrane EPDM ou un géocomposite en PVC) est beaucoup moins sujette à ce genre de difficulté ;

- raccorder la géomembrane aux ouvrages béton et aux tranchées en crête et en pied en dernier lieu, ce qui permet d'attendre que la géomembrane ait achevé se stabiliser dimensionnellement (retrait thermique et retrait après déroulement). De manière générale, on évitera les heures les plus chaudes de la journée afin de réduire l'impact de la dilatation thermique.

Au cours des travaux, la réalisation d'un ancrage dans une tranchée en crête nécessite une fixation temporaire (calage partiel par graviers ou utilisation de pointes pour béton).

8.5.5. Installation d'un système de fixation sur le parement amont

Un contrôle du positionnement et de la bonne fixation au parement des systèmes de fixation mécanique est effectué. Cette étape est documentée.

En cas de doute concernant la solidité du support, il est recommandé de réaliser des essais destructifs sur certains ancrages avant d'installer le système de fixation de la géomembrane, et de vérifier ainsi la résistance à l'arrachement à certains endroits et le bon suivi des plans. Le nombre d'essais est fonction du site et doit être indiqué dans les études.

8.5.6. Assemblage des lés/panneaux de la géomembrane (joints confectionnés sur site)

Les joints doivent être réalisés dans des conditions météorologiques approuvées par l'entreprise installant le système d'étanchéité. Les soudures et l'équipement nécessaire à leur réalisation doivent être conformes et approuvés par des essais destructifs sur des joints-tests. Les joints réalisés sur place doivent être testés à 100 %. Tous les joints réparés doivent être testés à nouveau. Cette étape est documentée.

Cette étape peut signifier un POINT D'ARRÊT des travaux. Si tous les critères ne sont pas respectés, la construction ne peut pas se poursuivre.

La nature et la méthode de réalisation des joints entre les lés de géomembrane (chaleur, solvant, adhésifs) sont propres à chaque type de produit. C'est une étape critique de l'installation du DEG et elle doit être menée avec le plus grand soin, par du personnel qualifié uniquement.

En général, les travaux de soudure ne sont pas autorisés sous la pluie, la neige, par vents violents, dans la boue et par températures extrêmes (température de l'air inférieure à 5°C ou températures élevées), sauf si des dispositions spécifiques sont prises, selon le type de géomembrane.

Les surfaces de la géomembrane où le joint doit être réalisé doivent être planes, propres et sèches, particulièrement dans le cas d'un liant adhésif (typique d'une

Tableau 39. - Test contrôle qualité

			Entrepreneur		Maître d'ouvrage	Fréquence des contrôles	
			Ouvrier	Inspecteur contrôle qualité		Minimum (4)	Maximum (4)
Joints	ESSAIS DESTRUCTIFS (cisaillement et pelage)	ESSAIS INFORMATIFS NON NORMALISÉS Qualitatif	X(1)			Un pour chaque poste	Pour toutes les soudures
		Quantitatif		X(2)		Tous les 500 m si les tests sont OK (5)	Tous les 100 m si quelques tests échouent (5)
		ESSAIS NORMALISÉS		X(3)	X(3)	Tous les 2 000 m si tous les tests Quantitatifs sont OK (5)	Tous les 1 000 m si quelques tests Quantitatifs échouent (5)
	ESSAIS NON DESTRUCTIFS	Qualitatif	X(8)	X(8)		Pour toutes les soudures	Pour toutes les soudures
		Instrumental		X(9)		Tous les 2 000 m	Tous les 1 000 m
		Instrumental			X(9)	Tous les 2 000 m (6)	Tous les 1 000 m (6)
Joints - Points Triples	ESSAIS NON DESTRUCTIFS	Qualitatif	X(8)	X(8)		Pour tous les points triples	Pour tous les points triples
		Instrumental		X(9)		Tous les 1 500 m ²	Tous les 750 m ²
		Instrumental			X(9)	Tous les 1 500 m ²	Tous les 750 m ²
Liaison aux ouvrages béton	ESSAIS NON DESTRUCTIFS	Qualitatif	X(10)			Pour toute la longueur de la liaison	Pour toute la longueur de la liaison
		Instrumental		X(11)		Pour toute la longueur de la liaison	Pour toute la longueur de la liaison
		Instrumental			X(11)	20 % (7) (6)	100 % (7) (6)

- (1) Essai destructif, qualitatif : sur site, sans extensomètre portable (traction par attaches, manuelle, etc.).
- (2) Essai destructif, quantitatif : réalisé avec un extensomètre portable sur un nombre réduit d'échantillons et enregistrement des données.
- (3) Essai destructif, quantitatif : essai standard, réalisé dans un laboratoire autorisé. Plusieurs normes internationales sont disponibles.
- (4) Les essais doivent être réalisés par une entreprise avec expérience dans l'étanchéité des barrages (nombre minimum d'essais) ou par un entrepreneur sans expérience dans l'étanchéité des barrages (nombre maximum d'essais).
- (5) Signifie un échantillon prélevé pour tester X mètres de soudures.
- (6) Date à convenir avec le responsable Contrôle Qualité désigné par le MO.
- (7) Signifie le pourcentage testé sur la longueur totale.
- (8) Essais non destructifs qualitatifs : passer une pointe sur le joint, afin de détecter toute zone non soudée, Lance à air : air comprimé, soufflé le long de la soudure pour détecter toute zone non liée.
- (9) Essais non destructif, instrumental : boîte à vide. Le filon est rempli d'une solution savonneuse et équipé d'une boîte à vide. La boîte est mise en dépression pendant que l'opérateur observe le filon à travers la fenêtre. Un faisceau de bulles met en évidence des discontinuités éventuelles.
- (10) Essai non-destructif (qualitatif) : tous les écrous de fixation des plats d'ancrage sont serrés à l'aide d'une clé à chocs réglée sur une couple de serrage spécifique.
- (11) Essai non-destructif (instrumental) : tous les écrous de fixation des plats d'ancrage sont serrés à l'aide d'une clé dynamométrique réglée sur une couple de serrage spécifique.

EPDM) ou d'un soudage par extrusion. L'utilisation d'un support temporaire peut être nécessaire (par exemple une planche de bois ou une feuille de plastique rigide), placé entre le parement et la zone à souder. Ce support temporaire est déplacé au rythme de la réalisation du joint.

Pour tous les types de géomembranes, un essai de démonstration doit être réalisé au début de l'opération de soudure. Pour les machines automatiques de soudage, un test permettant d'ajuster les différents paramètres doit être réalisé au début de chaque poste de soudure, pour identifier de possibles dysfonctionnements de l'outil de soudage ou pour certains types de produits (PVC-P, fPP), un écoulement inadéquat qui pourrait empêcher la réalisation d'une soudure correcte.

8.5.7. Étanchéité des joints périphériques

Le bon positionnement des joints de type mécanique est vérifié, comme la présence de tous les composants. Tous les boulons d'ancrage sont testés au couple de serrage indiqué. Cette étape est documentée.

Le positionnement et les procédures d'exécution des joints de type insert sont vérifiés, notamment par des tests de résistance à l'arrachement d'intensité convenue et à des emplacements déterminés. Cette étape est documentée. Parce qu'il s'agit d'un essai destructif, une zone d'essai spécifique devra être équipée du même système de fixation.

8.5.8. Inspection finale du positionnement de la géomembrane

L'inspection finale pour vérifier l'intégrité de la géomembrane doit être exécutée une fois toutes les autres actions effectuées, afin de certifier que la géomembrane n'est pas endommagée. Si nécessaire, des réparations sont réalisées. Cette étape est documentée.

Cette étape peut signifier un POINT D'ARRÊT des travaux. Si tous les critères ne sont pas respectés, la construction ne peut pas se poursuivre.

Il existe quelques méthodes pour s'assurer de l'intégrité de la géomembrane (les joints ont été testés selon les procédures mentionnées au 8.5.6) à la fin des travaux. La plus simple consiste à inspecter visuellement la géomembrane pour détecter les possibles défauts, trous d'épingle, entailles, etc.

D'autres utilisent un système de détection des fuites qui contrôle également la performance du DEG. Plusieurs configurations sont possibles, qui continuent d'être développées par certaines sociétés. Parce que ces systèmes prometteurs n'en sont qu'au stade expérimental, il est fortement recommandé que le maître d'ouvrage réalise un essai à échelle réelle du système proposé avant de donner son accord pour la construction.

- a) Installation d'un réseau fixe de capteurs sous la géomembrane. Adopter une grille de 10 × 10 m ou moins, et connecter chaque électrode par un câble à un boîtier de connexion situé à l'extérieur du barrage. Le principe du système consiste à créer un champ électrique entre une électrode active immergée dans le réservoir ou au-dessus de la couche de couverture et le réseau d'électrodes installé sous la géomembrane. Les données électriques

correspondant aux vérifications pour le barrage dans son ensemble sont collectées dans un boîtier d'acquisition extérieur au barrage (normalement en crête), qui est connecté en permanence ou sur demande à un logiciel d'acquisition et d'interprétation des données, ce qui permet de créer une carte des anomalies et de localiser les fuites dans la géomembrane.

- b) Installation d'un réseau fixe de capteurs sous la géomembrane et d'un géotextile conducteur. En règle générale, le réseau fixe d'électrodes est activé uniquement lorsque de l'eau passe à travers la géomembrane. Le contrôle ne peut donc être effectué que lorsque le réservoir est rempli. Face à ce problème, la pose d'une couche supplémentaire formée d'un géotextile composé de nombreuses fibres de carbone hautement conductrices permet de vérifier la conductivité de la géomembrane et donc son intégrité, et ce même en absence d'eau.
- c) Localisation d'une fuite par un capteur mobile, en l'absence d'un réseau fixe de capteurs placé sous la géomembrane. Ce système fonctionne même si une couche de matériaux granulaires recouvre la géomembrane. Un champ électrique est créé entre une électrode placée dans le corps du barrage et un certain nombre d'électrodes mobiles (généralement disposées en tripode) déplacées par un technicien à la surface de la géomembrane ou de la couche de couverture. Les données électriques sont enregistrées par l'unité d'acquisition transportée par le technicien, puis transférées dans un logiciel d'acquisition et d'interprétation des données qui permet de créer une carte des anomalies et de localiser précisément les éventuelles fuites de la géomembrane. Ce système ne fonctionne pas si la couche de couverture dépasse 40 à 50 cm d'épaisseur, si elle est en béton ou si elle contient de l'acier (par exemple pour renforcer le béton).
- d) Localisation d'une fuite par un capteur mobile, en l'absence d'un réseau fixe de capteurs placé sous la géomembrane. La conductivité augmente grâce à la pulvérisation de gouttelettes d'eau sur la géomembrane. Ce système est absolument identique à celui décrit en (c). Après la pulvérisation de gouttelettes d'eau augmentant la conductivité de la géomembrane en cas de trou, l'électrode mobile explore la totalité de la surface de cette dernière. Ce système ne fonctionne pas en présence d'une couche de couverture.
- e) Localisation d'une fuite par un capteur mobile, en l'absence d'un réseau fixe de capteurs placé sous la géomembrane. Détecteur de porosités. Ce système est absolument identique à celui décrit en (c), mais il n'y a pas d'acquisition de données. Un fer plat (mesurant en général 1 à 2 m de large) chargé d'un champ électrique (grâce à une batterie de voiture) est déplacé au dessus de la surface. En cas de trou dans la géomembrane, le circuit électrique se referme, et l'appareil envoie un signal (étincelle, sifflement, lumière clignotante, etc.). Sa performance est amoindrie si la géomembrane n'est pas en contact direct avec le parement (par exemple s'ils sont séparés par un géofilet ou un géotextile épais). Ce système est très répandu. Avant de procéder au contrôle sur le barrage, il est préférable de réaliser un test de fonctionnement.
- f) Câble à fibres optiques. L'utilisation de systèmes de contrôle par câbles à fibres optiques pour détecter la présence d'eau s'appuie sur la capacité des câbles à fibres optiques à capter la répartition de chaleur à l'intérieur du

câble. Une technique de mesure très avancée permet d'analyser et d'évaluer les changements d'état, et ainsi de décrire avec précision la répartition de la chaleur le long des fibres. Le câble est placé sur le parement amont, sous la géomembrane d'étanchéité, en formant des réseaux de mesure verticaux ou horizontaux. S'il y a de l'eau entre la géomembrane et le parement amont du barrage, celle-ci va s'écouler vers le bas en raison de la gravité, toucher le câble, et modifier la répartition « normale » de la chaleur à proximité du câble. Le câble va capter ce changement de température et déterminer le point où l'eau entre en contact avec lui, indiquant ainsi la présence d'eau ou simplement d'humidité dans la zone verticale au-dessus du point où la température a changé. Par contre, l'eau détectée peut aussi bien se trouver en amont de la géomembrane (défaut de la géomembrane pouvant être détecté par un contrôle visuel ou l'une des méthodes mentionnées ci-dessus) qu'en aval de la géomembrane (infiltration d'eau provenant de la crête, des appuis latéraux, des fondations, etc.). Une bonne compréhension du système et de l'interprétation des données est nécessaire pour déterminer la source de l'infiltration. Ce système a été utilisé sur certains barrages (Brandbach, Winscar, Kadamparai).

Tous les systèmes mentionnés ci-dessus permettent de localiser les fuites dans la géomembrane, mais pas de contrôler la qualité des joints. Certains systèmes auraient la capacité de détecter un trou de 1 mm de diamètre dans un rayon de 50 cm. Le coût de ces systèmes est relativement élevé par rapport au coût total du DEG et implique de ne les utiliser que si la construction semble de mauvaise qualité ou en cas de dommage accidentel. Un programme de contrôle qualité approprié, dûment appliqué par des professionnels, permet d'obtenir des DEG sans défaut. Cependant, si ce sont des entreprises inexpérimentées qui sont chargées de la construction, le risque d'obtenir de mauvais résultats est bien plus élevé et un système de détection des fuites peut s'avérer un investissement utile pour repérer les défauts.

8.5.9. Pose de la couche de couverture

Avant de mettre en place la couche de couverture, l'intégrité de la géomembrane doit être contrôlée. Le contrôle qualité vérifie également que le géotextile de protection est correctement positionné et que les différentes étapes liées à la construction ont été effectuées de façon à ne pas endommager la géomembrane ou le géotextile. Cette étape est documentée.

Aucun véhicule, quel qu'il soit, ne doit circuler sur la géomembrane, même pendant la pose de la couche de couverture.

Si la couche de couverture est en béton, celui-ci doit être pompé, et le camion toupie ne doit pas se trouver sur la géomembrane ni endommager le parement. Si la couche de couverture est en terre, en gravier, en sable ou en rip-rap, elle doit avoir une épaisseur d'au moins 30 cm. La couche de couverture doit être posée sur la géomembrane/le géotextile et ne doit jamais être poussée pour être étalée.

Si la couche de couverture est faite d'éléments préfabriqués, comme des dalles ou des blocs de béton, les éléments préfabriqués doivent être posés avec la plus grande précaution pour éviter de trous la géomembrane. La planéité du parement

doit être vérifiée, pour éviter des contraintes trop importantes aux points de contact entre l'élément préfabriqué et la géomembrane.

Bien souvent, une couche de géotextile est placée entre la géomembrane et la couche de couverture. Si cette dernière est en béton, le géotextile fera office d'armature.

Si nécessaire, la couche de couverture sera construite immédiatement après la pose de la géomembrane, par étapes. Cette étape constitue un POINT D'ARRÊT de la construction : si elle n'est pas réalisée conformément aux exigences du contrôle qualité, la construction du DEG doit être interrompue.

8.5.10. Contrôle final du dispositif d'étanchéité par géomembranes

Après la pose de la couche de couverture, un contrôle final de l'intégrité de la géomembrane doit être effectué, afin de s'assurer que cette couche n'a pas été endommagée. Cette étape est documentée.

Le contrôle final peut être réalisé grâce à l'un des systèmes de détection de fuites décrits en 8.5.8.

8.5.11. Documentation

Tous les documents doivent être signés et conservés par toutes les parties impliquées.

9. CONSEILS SUR LE CONTENU TECHNIQUE DES CONTRATS

Ce chapitre est consacré aux principaux facteurs à prendre en compte dans le cadre d'une offre ou d'un contrat d'utilisation de dispositifs d'étanchéité par géomembranes sur un barrage.

9.1. ASPECTS GÉNÉRAUX

L'objectif d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane est d'assurer, ou de retrouver, l'imperméabilité d'un barrage. L'efficacité, la fiabilité et la durabilité dépendent d'une multitude de facteurs qui comprennent la valeur technique de la conception du dispositif d'étanchéité, la qualité des matériaux ainsi que la capacité et le savoir-faire de l'entrepreneur responsable des travaux d'étanchéité. Les spécifications techniques doivent prendre en compte l'ensemble de ces facteurs.

Afin d'obtenir le meilleur rapport qualité prix, il est recommandé de séparer les travaux d'étanchéité de ceux d'un entrepreneur général, tels que des travaux de terrassement ou de béton destinés à des barrages en terre ou BCR, par exemple. Cette séparation est recommandée en raison de la diversité des activités.

Cependant, il est plus simple pour le maître d'ouvrage de traiter avec un seul entrepreneur (ou en exploitation conjointe) pour régler les problèmes d'interaction entre les différents entrepreneurs et ceux liés à la garantie. Dans le cas d'un nouvel ouvrage, on fera généralement appel à l'entrepreneur principal responsable des travaux de terrassement et de bétonnage. En cas d'une réhabilitation de barrage, il serait préférable de confier le contrat à l'entrepreneur responsable des travaux d'étanchéité.

Pendant la phase d'appel d'offre, le maître d'ouvrage peut décider de mettre à disposition la conception détaillée du dispositif d'étanchéité ou d'en fournir les principales directives. L'entrepreneur devra ensuite soumettre la conception détaillée au maître d'ouvrage afin que celui-ci l'approuve. Dans la majorité des pays, les travaux de construction et de réhabilitation des barrages sont inspectés et contrôlés par des autorités indépendantes responsables de la sécurité des ouvrages. De ce fait, le résultat des travaux devra répondre à la réglementation du pays. Il est par conséquent de la plus haute importance que le maître d'ouvrage informe le soumissionnaire de l'objet des travaux et des principales lignes de conception dans le cas où la conception détaillée n'aurait pas été présentée au cours de l'appel d'offre. Les travaux et la conception doivent répondre aux exigences du maître d'ouvrage et des autorités. Cette tâche peut s'avérer extrêmement compliquée et nécessiter beaucoup de temps.

Bien que la technologie des géomembranes pour les barrages existe depuis la fin des années 50 et qu'un nombre important de projets ait été réalisé avec succès sur tous les continents, de nombreux ingénieurs la considèrent toujours comme une « nouvelle technologie ». De plus, peu d'ingénieurs ont les connaissances nécessaires en chimie pour comprendre les propriétés, le comportement et la performance attendue de la géomembrane, ainsi que des matériaux synthétiques en général.

C'est pour cette raison que le maître d'ouvrage, personne devant être la plus intéressée par cette technologie en raison de ses qualités techniques et économiques, devra se charger de la conception ou établir au moins ses lignes directrices. Il devra également fixer des exigences minimum afin d'assurer que toutes les offres répondent à des critères de qualité satisfaisants pour le projet. Ces critères devront permettre de garantir que le résultat des projets d'étanchéité correspond aux exigences des autorités et aux critères en termes de sécurité, de durabilité, d'investissement en capital et de coûts de maintenance.

La géomembrane constitue l'élément principal des travaux d'étanchéité. L'efficacité, la fiabilité et la durabilité des chantiers d'étanchéité dépendent principalement, mais pas seulement, des propriétés et de la qualité de la géomembrane choisie. Les spécifications doivent décrire très précisément le type de géomembrane et ses propriétés.

Il faut souligner le besoin que soient établies des spécifications mieux adaptées et plus détaillées. Même des documents de conception mis à jour spécifient rarement les caractéristiques chimiques des matériaux synthétiques (telles que la quantité d'additifs autre que la résine de base, le pourcentage de matière cristalline, le poids moléculaire, le temps d'oxydation, etc.) : pourtant, ces caractéristiques sont essentielles à une bonne définition du produit. La performance des dispositifs futurs en dépend.

Le choix de l'installation (exposée ou couverte) et de la géomembrane (PVC, EPDM, CSM, polyéthylène, etc.) influe sur la préparation du support, le type de fixation et de soudure, le contrôle qualité, la méthode de mise en place, la possibilité de réparation, etc. En principe, après avoir achevé la conception à partir d'un type particulier de géomembrane, il est très difficile d'opter pour un autre type de géomembrane car cela aurait une incidence sur la plupart des paramètres. Une fois la conception terminée, le type de géomembrane ne peut être changé que si TOUS les autres paramètres de la conception sont vérifiés et qu'ils répondent à toutes les conditions requises.

L'interaction entre les divers composants du dispositif d'étanchéité est primordiale. Pour que le projet fonctionne conformément aux attentes du maître d'ouvrage, il est préférable d'utiliser des matériaux préalablement testés à grande échelle dans le même type d'aménagement, fabriqués et installés par des entreprises possédant des références sur des barrages de même taille.

Les niveaux de sollicitation agissant sur un barrage sont habituellement beaucoup plus élevés que ceux appliqués sur une géomembrane mise en place dans les toitures, les installations de stockage des déchets, les tunnels routiers, les fondations ou les travaux souterrains en général, où la pression exercée par la charge hydrostatique sur le revêtement est en général faible ou exceptionnelle. Nous n'avons pas forcément les connaissances pour savoir si les matériaux et les procédures efficaces dans ces types d'aménagements le seront nécessairement dans les barrages. Dans les barrages, la géomembrane est exposée à diverses sollicitations : une charge hydrostatique constante, parfois très élevée, de fortes variations de températures extrêmes, des joints actifs, des structures déformables, des impacts dus à l'environnement extérieur, un accès difficile, des réparations complexes et l'exigence d'une longue durée de vie.

En fonction du type de barrage, le coût total des travaux d'étanchéité est très différent selon que la géomembrane est couverte ou non.

Dans un système de géomembrane couverte, le coût de la géomembrane et de sa mise en place peut être moindre, mais l'étendue des travaux de préparation du support et les coûts relatifs à la pose de la couche de couverture peuvent être importants. Le système de contrôle qualité est également onéreux car il s'applique non seulement au système de la géomembrane mais aussi à la mise en place de la couche de couverture. En cas d'accident, un dispositif de géomembrane exposée peut être réparé à moindres frais de manière efficace, simple et rapide. Dans un dispositif par géomembrane couverte, seules des méthodes très complexes, coûteuses et longues permettent de repérer un défaut. Ensuite, la réparation sera extrêmement onéreuse car les coûts dus au retrait et à la réinstallation de la structure de couverture seront très importants. C'est pourquoi le contrôle qualité dans un dispositif de géomembrane couverte est plus exigeant que dans un dispositif de géomembrane exposée. Il est nécessaire d'exécuter un travail parfait car il n'y a pas de seconde chance.

En raison de la qualité actuelle des géomembranes, adaptées à des expositions à long terme, le besoin d'une couche de couverture devra être justifié tant d'un point de vue économique que technique.

La distribution interne des coûts varie énormément entre le dispositif de géomembrane lui-même (matériaux + mise en place) et les travaux connexes (préparation du support, drainage, couche de couverture). Une géomembrane plus épaisse, plus efficace et généralement plus onéreuse, garantit une durée de vie plus longue et moins de travaux de génie civil lors de la préparation du support.

Dans un dispositif de géomembrane non couverte, les coûts majeurs sont liés à la conception, à la qualité du système de géomembrane et de drainage, au système de fixation et à la mise en place.

Comme dans tous les autres secteurs de l'ingénierie, il n'existe pas de produit miracle pour l'étanchéité des barrages, c'est-à-dire de produit qui s'adapte à tous les besoins. Choisir un dispositif d'étanchéité uniquement en fonction du prix de la géomembrane n'est pas judicieux, puisque cette dernière ne constitue qu'une partie du système.

Tout d'abord, le maître d'ouvrage doit opter pour un système de géomembrane couverte ou non. S'il choisi un système de couverture, il existe un plus grand nombre de géomembranes qui peuvent convenir, car les conditions de résistance et de durée de vie par rapport à l'environnement sont inférieures, et leur coût est donc moins élevé. Cependant, le maître d'ouvrage doit budgéter le montant de la couche de couverture et le risque d'endommagements pendant la mise en place. Dans la plupart des cas, il est plus difficile de concevoir le dispositif de couverture que le système de géomembrane lui-même. La couche de couverture est habituellement beaucoup plus onéreuse que la géomembrane et le coût du contrôle qualité doit être correctement évalué, afin d'éviter les dommages pendant la mise en place.

Si la géomembrane est exposée, il existe peu de types de géomembranes adaptées, qui peuvent apporter la preuve de leur pérennité en service. Ces géomembranes sont habituellement un peu plus onéreuses mais il n'est pas nécessaire d'investir dans une couche de couverture supplémentaire.

En général, une géomembrane adaptée à des installations non couvertes serait trop onéreuse pour un usage avec couverture. Une géomembrane moins coûteuse, utilisée essentiellement avec une couche de couverture, n'est pas adaptée à une exposition non couverte, efficace et de longue durée.

Les technologies des géomembranes offrent un autre avantage en cas de défaillance. Les techniques arrivées à maturité, comme le béton, ne fournissent pas de réponses rapides et efficaces par le biais d'un système de contrôle qui évalue leur efficacité. La technologie des géomembranes permet de détecter immédiatement les plus petits défauts, grâce à la collecte d'eau et au système d'évacuation qui, dans des ouvrages hydrauliques, devrait toujours faire partie d'un DEG, et qui offre un moyen plus rapide pour contrôler la qualité des travaux effectués.

Même avec une technique bien développée et répandue comme celle du béton, des ouvrages peuvent encore être mal exécutés. Défauts, ou éventuellement malfaçons, sont courants et généralement acceptés.

En utilisant la technologie des géomembranes, compte tenu des connaissances considérables et de l'expérience requise, on s'attend à un résultat parfait.

Un éventuel problème survenant sur un dispositif de géomembrane, même de petite entité, fera l'objet de critiques.

Une qualité insuffisante de la main d'œuvre dans la technique du béton est considérée comme possible, mais elle ne serait pas acceptée dans la technique de la géomembrane.

Les maîtres d'ouvrages, les concepteurs, les fournisseurs, les poseurs de géomembranes doivent savoir que la technique de la géomembrane peut garantir un haut niveau d'étanchéité à l'eau, pratiquement impossible à atteindre avec toute autre méthode de construction.

Lors des études d'un ouvrage béton, des recherches détaillées sont normalement menées afin de déterminer les propriétés du béton, les contraintes thermiques, l'évolution dans le temps, le renforcement requis, le traitement des joints, les méthodes de mise en place, etc.

Il convient d'appliquer exactement le même concept pour les géosynthétiques. On doit tenir compte des sollicitations appliquées ; la géomembrane, le système de fixation, le drainage et son évacuation doivent être convenablement conçus et sélectionnés. Ensuite, il convient de choisir la méthode de mise en place et enfin, de mettre en œuvre un plan complet de contrôle qualité. Tous les détails du dispositif d'étanchéité doivent être intégrés dans un concept général. Il est indiscutable que l'enseignement des géosynthétiques n'est pas fréquent dans les programmes actuels de formation des ingénieurs de génie-civil, néanmoins un manque de connaissances spécifiques ne suffirait pas à excuser une conception et une construction de qualité insuffisante des dispositifs d'étanchéité par géomembranes. De nos jours, des méthodes de conception précises ont été développées, des recherches étendues sur les matériaux ont été menées, des systèmes de contrôle qualité pour l'intégralité du processus existent et des techniques d'installation fiables ont été mises en œuvre.

Aujourd'hui, aucune étude d'ouvrages ambitieux de génie civil n'est effectuée par les bureaux d'ingénierie sans s'appuyer sur des expériences semblables. Il devrait en être de même pour les systèmes de géomembranes dans les barrages.

Les grands projets actuels de génie civil ne sont pas confiés à des sociétés qui manquent d'expérience, de personnel et d'ouvriers qualifiés. Ceci est d'autant plus vrai pour les géosynthétiques en général et les géomembranes en particulier. Il est préférable que les projets de géomembranes dans les barrages soient exécutés par des entreprises avec une expérience bien établie sur des projets analogues, à la fois pour le type de travail (géomembrane exposée ou couverte) et pour la dimension (quantité de revêtement à installer par rapport au temps disponible, système de fixation utilisé, type de support, hauteur du barrage, type d'environnement, etc.)

Les géomembranes sont choisies selon la qualification du fournisseur de résine et du fabricant de géomembrane. Selon le type de résine utilisée pour la géomembrane, la qualification du fournisseur peut être primordiale. Une résine comme le polyéthylène est directement fournie par de très grandes usines chimiques, la résine est plutôt standard et donc la qualité du produit correspond généralement aux caractéristiques techniques. D'après les statistiques, le PVC est la résine la plus utilisée dans les géomembranes pour les barrages et les aménagements hydrauliques. Une résine de ce type est préparée selon une infinité de formules possibles. Ainsi, le retour d'expérience du fournisseur est capital pour démontrer la capacité du produit fourni à répondre aux exigences de pérennité attendues. Cependant, l'expérience ne suffit pas à garantir la qualité et l'efficacité du produit final.

Les maîtres d'ouvrages, les concepteurs, les fournisseurs et les poseurs de géomembranes ont aujourd'hui à leur disposition tous les outils pour réaliser des projets très efficaces, du point de vue de la technique, de la rentabilité, de la pérennité et du coût. Afin d'atteindre cet objectif, il convient de préparer des spécifications d'approvisionnement adéquates, qui seront incluses dans les dossiers d'appels d'offres pendant la procédure de consultation et seront précisées dans les documents du contrat.

Les clauses techniques et administratives à la base des appels d'offres doivent décrire les directives élémentaires des exigences et/ou une liste détaillée des critères auxquels les candidats doivent satisfaire.

À la fin du processus d'appel d'offres, le maître d'ouvrage doit avoir obtenu des réponses précises par rapport à la liste de critères suivants. Certains éléments doivent être apportés par le maître d'ouvrage (informations générales, paragraphe 9.9.1), d'autres par l'entrepreneur qui soumissionne (programme des travaux, références, garantie).

Pour les pièces restantes, deux options sont possibles :

a) elles peuvent être entièrement spécifiées par le maître d'ouvrage (caractéristiques techniques) et le candidat doit s'y conformer, ou

b) le maître d'ouvrage doit présenter des directives élémentaires pour une solution acceptable. Ensuite, le soumissionnaire doit communiquer une proposition détaillée, accompagnée de schémas, de calculs, de documents comportant des données techniques, de tests effectués par des laboratoires indépendants, d'échantillons, etc.

Du point de vue technique, il est fortement conseillé au maître d'ouvrage de choisir l'option a) (conception détaillée). Cette option est plus avantageuse car la

conception sera en parfait accord avec les conditions requises pour le projet ainsi qu'avec les lois et réglementations officielles. Étant donné que de nombreuses solutions conceptuelles pour les dispositifs d'étanchéité par géomembranes sont brevetées, le maître d'ouvrage peut négocier à l'avance le coût de cette technique. L'évaluation des propositions est plus simple et plus juste car tous les soumissionnaires ont accès aux mêmes ressources. Les entreprises entrant en concurrence seront plus nombreuses car le coût de l'élaboration de la réponse à l'offre est moindre. Néanmoins, le maître d'ouvrage devra leur permettre de proposer une ou plusieurs solutions alternatives à la solution de base obligatoire. Ces solutions alternatives devront toutefois respecter les principales exigences requises par la solution de base. Le secteur géosynthétique est très actif, de nouvelles idées peuvent très bien être développées entre le moment de l'avant projet sommaire sur lequel se fonde l'appel d'offres et son lancement. Le maître d'ouvrage doit indiquer les exigences fondamentales que devront satisfaire les autres propositions.

Les éléments à fournir par le maître d'ouvrage aux soumissionnaires sont listés à l'Annexe 9.9.1.

9.2. SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

Quelle que soit la personne morale chargée de la conception du système d'étanchéité, qu'il s'agisse du maître d'ouvrage ou de l'entrepreneur, les éléments suivants devront être inclus dans le détail de la conception finale.

9.2.1. Matériaux

De manière générale, les dispositifs d'étanchéité par géomembranes utilisés dans les barrages sont constitués de divers éléments fabriqués à partir de matériaux différents. Chaque élément remplit une fonction bien spécifique. En fonction du dispositif d'étanchéité, les matériaux utilisés sont différents. Certaines catégories sont cependant plus fréquentes et peuvent être classées comme suit :

- Matériaux synthétiques
- Matériaux utilisés pour la fixation (membrane exposée) ou le ballastage (membrane couverte)
- Matériaux de drainage (synthétiques ou naturels)
- Autres matériaux (pour les joints périphériques, pénétrations, ventilation, etc.).

De manière générale, il est important de déterminer les exigences relatives à tous les matériaux utilisés ; soit en indiquant les valeurs des propriétés conformément aux normes, soit en décrivant le comportement exigé des matériaux dans des conditions bien particulières.

La manière d'établir la conformité aux spécifications doit être spécifiée.

9.2.1.1. Matériaux synthétiques

La géomembrane et l'élément essentiel du dispositif d'étanchéité. L'efficacité, la fiabilité et la durée de vie des ouvrages étanches dépendent des propriétés et de la qualité de la géomembrane sélectionnée. Les spécifications doivent être très précises dans la description du type et des propriétés de la géomembrane.

Liste des spécifications générales applicables aux géomembranes et aux géocomposites, selon le type de la géomembrane et de sa situation (exposée ou couverte) :

- Caractéristiques chimiques
 - Résine (origine, identification, date de production)
 - Poids moléculaire
 - Pourcentage de matière cristalline
 - Quantité et type d'additifs autres que la résine de base
- Caractéristiques physiques
 - Épaisseur (géomembrane uniquement et géomembrane et géotextile en cas de géocomposite)
 - Masse surfacique (géotextile uniquement)
 - Tension de rupture du géotextile
 - Allongement à la rupture du géotextile
 - Tension de rupture de la géomembrane
 - Allongement à la rupture de la géomembrane
 - Résistance à la déchirure
 - Résistance au poinçonnement
 - Friabilité à faible température
 - Perte volatile
 - Lixiviation
 - Stabilité dimensionnelle (test à haute température, variable selon le produit considéré)
 - Résistance aux UV (test pour une exposition à un fort rayonnement UV)
- Propriétés environnementales
- Conditions environnementales spécifiques auxquelles le revêtement doit résister.

9.2.1.2. Matériaux de fixation

La géomembrane peut être exposée et alors fixée mécaniquement grâce à des profilés en acier ou en plastique. Elle peut également être couverte, et dans ce cas, le matériau de couverture et le mode de fixation doivent être spécifiés.

- Fixation mécanique
 - Caractéristiques chimiques et métallurgiques
 - Type de métal
 - Identification du métal par un numéro ou un nom
 - Type de protection/revêtement

- Caractéristiques physiques
- Caractéristiques de contrainte
- Caractéristiques de déformation
- Résistance à divers impacts.

9.2.1.3. Matériaux de drainage

Le matériau de drainage peut être synthétique (géofilet, géotextile, etc.) ou naturel (graviers).

- Matériau synthétique
 - Caractéristiques mécaniques
 - Structure
 - Polymère
 - Stabilisateur UV
 - Épaisseur sous des contraintes d'écrasement variées
 - Dimension
 - Résistance en traction
 - Allongement à la rupture
 - Caractéristiques hydrauliques
 - Transmissivité sous des contraintes d'écrasement variées.
- Matériau naturel
 - Courbe dimensionnelle
 - Perméabilité
 - Type de granulats (écrasés, arrondis, etc.)
 - Compactage.

9.2.1.4. Autres matériaux

L'utilisation d'autres matériaux est nécessaire pour parachever l'installation. La résine est le matériau le plus communément utilisé pour préparer le support sur lequel le joint périphérique étanche est ancré. Le joint sert à répartir les forces d'écrasement, les ancrages chimiques et/ou mécaniques sont utilisés pour fixer les profilés mécaniques au support.

- Résine
 - Origine, base
 - Durée pratique d'utilisation
- Joints caoutchouc
 - Origine, base
 - Structure cellulaire
 - Densité
 - Dureté Shore
 - Compression - déflexion à différents degrés de chargement
 - Déformation rémanente après écrasement
 - Absorption de l'eau

- Plage de température
- Retrait linéaire après une période et une température déterminées
- Allongement à la rupture
- Résistance en traction
- Résistance à la déchirure
- Résistance à différentes substances (ozone, pétrole, solvants, acide, alcali, etc.)
- Résistance aux conditions climatiques (rayons UV, gel, chaleur, etc.)
- Ancrages chimiques
 - Type de résine, caractéristiques mécaniques
 - Conditions d’approvisionnement (ampoules verre, cartouches, etc.)
- Ancrages mécaniques
 - Type d’acier, caractéristiques mécaniques.

9.2.2. Dispositif d’étanchéité

9.2.2.1. Description des éléments

Description et fonction des éléments du dispositif d’étanchéité.

9.2.2.2. Préparation de la surface

Description de la préparation et des critères d’acceptation de la surface. La rugosité que peut accepter la surface sur laquelle le système d’étanchéité est installé dépend du type de la géomembrane, de la couche de drainage, de la couche anti-poinçonnement (s’il y en a une), des propriétés mécaniques de la géomembrane, et de la charge hydraulique. Il est plus critique de fixer une géomembrane rigide sur une surface très rugueuse, avec quelques mètres de charge hydrostatique (par exemple, une géomembrane PEHD sur un support constitués d’agrégats de dimension maximale 50 mm pour une charge hydrostatique de 10 m), plutôt qu’une géomembrane fine et flexible sur une surface très lisse (par exemple, un géocomposite en PVC sur la face lisse en béton d’un barrage en BCR pour une charge hydrostatique de 200 m). Il est recommandé de tester, dans un récipient pressurisé, le dispositif d’étanchéité proposé sur un support présentant les conditions les moins favorables du dispositif d’étanchéité proposé. Pour définir la rugosité de la surface, le degré de finition peut être identifié dans les directives techniques de l’Institut international de la réparation du béton (International Concrete Repair Institute, directive n° 03732, janvier 1997, « Choix et spécification de la préparation de la surface en béton pour les joints, les revêtements et les protections en polymère - Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for Sealers, Coatings and Polymer Overlays »). On considérera qu’une surface finie ayant un profil de surface bétonnée de 5 (CSP 5) ou inférieur à 5 est acceptable.

9.2.2.3. Raccordement des lés/rouleaux

Spécification du type de raccordement (soudure simple ou double, automatique ou manuelle), méthode d’essais et critères d’acceptation de qualité des joints. Plusieurs normes sont disponibles.

9.2.2.4. *Joint périphérique*

Spécification des critères. En matière de réhabilitation plus particulièrement, les bords du système d'étanchéité sont placés perpendiculairement aux joints de dilatation, sur le parement amont. Si l'on ne prend pas les mesures appropriées, il se peut que, lorsque le barrage est en exploitation, l'eau contourne le joint périphérique du nouveau dispositif d'étanchéité et pénètre ainsi dans le système de drainage. L'eau serait alors transportée via ce système vers le point d'évacuation ou vers le poste de mesure, ce qui peut alors laisser penser que la géomembrane comporte une éventuelle anomalie. En réalité, la présence de cette eau est due au fait que le plan du nouveau revêtement d'étanchéité (la face exposée) se trouve plus en amont que le plan précédent (les waterstops noyés dans le béton). Il est donc nécessaire d'accorder la plus grande attention à la conception du système d'interception du nouveau revêtement synthétique, aux joints horizontaux et verticaux, ainsi qu'aux fissures.

Au moment de définir les critères d'acceptation du nouveau revêtement, une grande attention doit être accordée à ce système d'interception. Celui-ci pourrait en effet entraîner l'infiltration de l'eau dans le système d'étanchéité, sans que ce dernier soit responsable de cette infiltration.

9.2.2.5. *Système de drainage*

Les caractéristiques du système de drainage doivent être définies. Par exemple, il faut s'interroger sur le type d'événement qui peut entraîner un certain débit dans le système de drainage et sur la quantité d'eau impliquée (une déchirure de la géomembrane par exemple). Étant donné que le système de drainage est soumis à une force de compression exercée par la charge hydrostatique, il est nécessaire d'évaluer la transmissivité de ce système en conditions normales de fonctionnement. L'installation d'évacuation doit être compatible avec le débit total pouvant être collecté par le système de drainage et avec son débit maximal d'évacuation, établi lors de la conception.

9.2.2.6. *Fixation*

L'ancrage de la géomembrane ne doit pas provoquer de contraintes anormales au niveau du dispositif d'étanchéité. Il doit également être capable de supporter son propre poids mort et toutes les charges externes (glace, vent, vagues, vidage). La capacité du système de fixation à supporter toutes les charges externes doit être prouvée et le coefficient de sécurité correspondant doit être déterminé, éventuellement par calculs. Si une couche de couverture est posée sur la géomembrane, elle doit, avant son installation, faire l'objet d'un test grandeur nature consistant à la placer sur la géomembrane, puis à l'enlever pour vérifier l'intégrité du revêtement synthétique.

9.2.2.7. *Preuve de conformité du matériel proposé*

Le candidat à l'appel d'offre doit prouver que la géomembrane et, de manière générale, le dispositif d'étanchéité par géomembrane, ont déjà été utilisés dans des conditions similaires.

Il peut en apporter la preuve en :

- donnant des exemples d'applications antérieures et en expliquant les conditions dans lesquelles la géomembrane a fonctionné.

Les références utiles sont celles qui montrent que le matériel proposé a été utilisé pendant les 10 dernières années au moins, et que la performance du matériel est documentée et/ou confirmée par des maîtres d'ouvrage et/ou des organismes indépendants. Voir Annexe 9.9.2.

9.2.2.8. *Preuve de conformité du système de fixation*

Le candidat à l'appel d'offre doit prouver que le système proposé a déjà été utilisé dans des conditions similaires.

Il peut en apporter la preuve en :

- présentant une liste des projets similaires dans lesquels le système proposé a déjà été utilisé. Les références applicables se rapportent aux applications antérieures du matériel proposé dans des barrages de type similaire (béton, BCR, remblai, etc.), de hauteur équivalente (au moins 70 % de la hauteur de l'ouvrage en objet), de surface semblable (au moins 50 % de la surface de l'ouvrage en objet) et de vitesse d'installation de même ordre de grandeur (au moins 70 % de la vitesse d'installation, en mètres carrés par mois, nécessaire pour l'ouvrage en objet).

Le matériel proposé et le système de fixation doivent obligatoirement avoir été utilisés pendant les 10 dernières années au moins et la performance du matériel doit avoir été documentée et/ou confirmée par des maîtres d'ouvrage et/ou des organismes indépendants. Pour avoir l'assurance que l'installateur n'a pas perdu la main, il faut qu'il ait pris part à au moins un projet datant de moins de 3 ans et dans lequel le système proposé a été utilisé.

Soumissions permettant de prouver l'efficacité des joints d'étanchéité.

Voir Annexe 9.9.2.

Les critères minimums requis sont suggérés dans l'Annexe 9.9.2.

9.2.3. La couche de couverture

Le candidat à l'appel d'offre doit indiquer le type de couche de lest proposé, la méthode d'installation, la dimension et la méthode à employer pour tester en conditions réelles l'installation de la couche de couverture en vue de déterminer la constructibilité de l'ouvrage.

9.3. CALENDRIER ET PROGRAMME D'INSTALLATION

Le candidat à l'appel d'offre doit transmettre un programme détaillé des travaux, dans lequel doit apparaître chaque semaine l'état d'avancement de chacune des tâches.

9.4. PLAN DE CONTROLE QUALITÉ

Un protocole de test doit être établi pendant la fabrication dans le cadre du contrôle qualité, et lors de l'installation pour vérifier la conformité du produit. Le protocole indique les parties du dispositif et les propriétés à tester, les méthodes de test, la fréquence à laquelle les tests doivent être réalisés, ainsi que l'organisme en charge de ceux-ci.

Il est recommandé de choisir une géomembrane et des matériaux (tous les matériaux principaux) qui ont fait l'objet de procédures de contrôle qualité certifiées ISO 9001 (ou certification équivalente). Le candidat à l'appel d'offre doit prouver que ses produits sont certifiés ISO 9002 ou 9001. Dans les projets les plus récents, il ne pouvait y avoir réception du matériel qu'après réalisation d'un audit par le concepteur, le consultant ou le maître d'ouvrage.

Pour ce qui est des tests de conformité, au moins une caractérisation complète du matériau constitutif de la géomembrane doit être fournie pour chaque lot produit.

Un laboratoire indépendant doit être désigné pour réaliser des tests d'identification et de conformité, et pour s'assurer du respect des normes applicables.

L'offre doit préciser ce qui fera l'objet d'un contrôle qualité lors de l'installation et exposer dans ses grandes lignes l'expérience dont dispose l'organisme choisi pour réaliser le contrôle qualité.

L'entrepreneur spécialisé dans l'étanchéité doit installer le revêtement d'étanchéité dans le respect des descriptifs de méthode approuvés. La certification ISO 9001, ou une certification équivalente, n'est pas considérée comme étant un critère suffisant dans le choix de l'installateur. Dans son offre, l'entrepreneur spécialisé dans l'étanchéité doit résumer les activités qui doivent faire l'objet d'un contrôle qualité.

9.5. LES CRITÈRES D'ACCEPTATION DES TRAVAUX RÉALISÉS

Les critères d'acceptation sont fondés sur la qualité des travaux réalisés ou sur la performance du dispositif d'étanchéité par géomembranes ou sur les deux.

9.5.1. Le revêtement

Quelques exemples :

- Revêtement exempt de poinçonnement, de déchirures, de trous ou de tout autre endommagement.
- Adhérence uniforme du revêtement à la partie bétonnée, sans affaissement ni pli.
- Revêtement s'adaptant parfaitement à la pente naturelle, sans zone soumise à une tension excessive, aux affaissements ou aux plis.
- Revêtement exempt de plis ou d'ondulations.

- Examen du revêtement à l'aide d'un détecteur électrique de défauts. On ne peut recourir à cette technique, employée pour examiner le revêtement, que par temps sec. Par ailleurs, elle ne permet pas d'obtenir des résultats fiables si un géofilet ou un géotextile épais se trouve entre la géomembrane et le support. Quelles que soient les conditions, il est bon de procéder à une inspection visuelle.

9.5.2. Fixations

Un exemple :

- Contrôle du couple indiqué pour les boulons d'ancrage des profilés d'ancrage.

9.5.3. Soudures

- Continuité et étanchéité des joints.

9.5.4. Fuites

L'eau sous pression contenue dans la retenue ne s'infiltré pas dans le parement amont s'il n'y a pas d'accumulation d'eau entre le revêtement synthétique et le support, ou si la pression hydrostatique est moindre comparée à celle qui est exercée par la retenue. Dans les critères d'acceptation, il est aujourd'hui courant de préciser

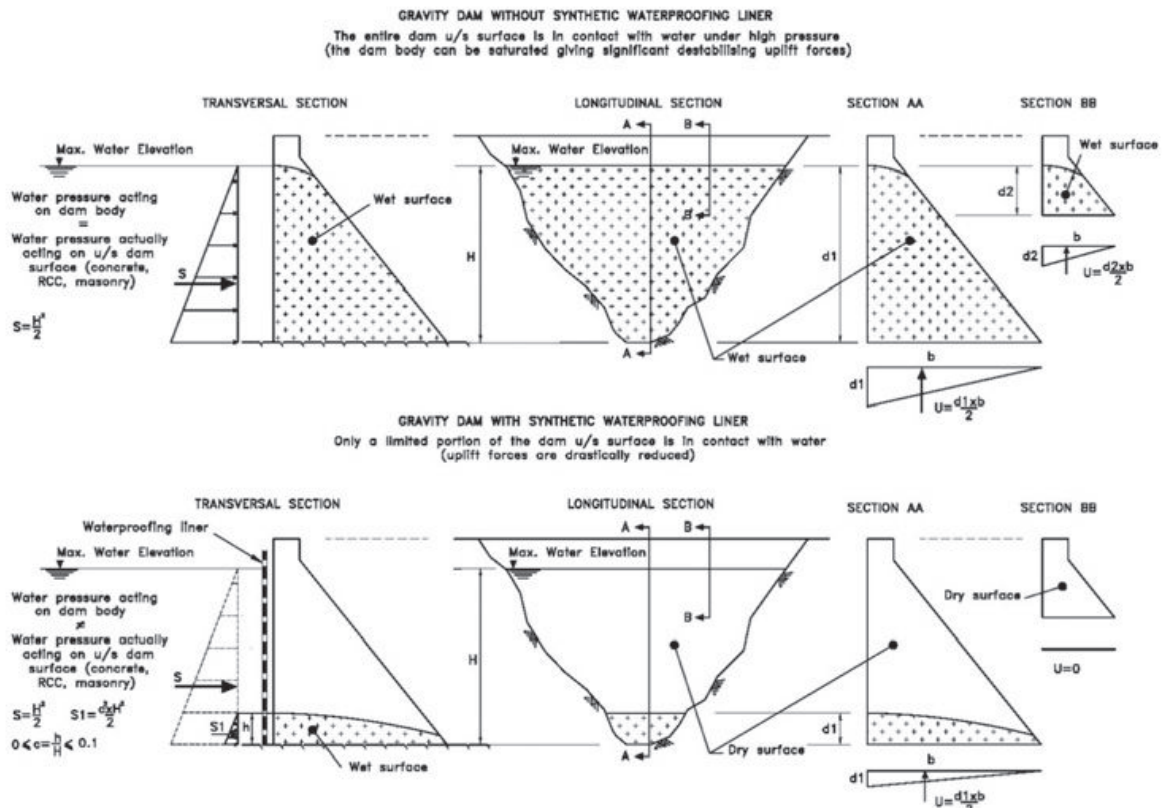


Fig. 134

La pression de l'eau avec et sans géomembrane sur le parement amont

également quel est le niveau de fuites accepté dans le parement amont ou dans chaque compartiment. Étant donné que le débit de fuite peut être différent si de l'eau contourne le joint périphérique, il est fortement recommandé d'associer ce débit à une mesure de pression hydraulique derrière le dispositif d'étanchéité, au niveau du tuyau d'évacuation de drainage. La pression hydrostatique de l'eau qui est passée derrière la géomembrane ne doit pas dépasser quelques pour cent du niveau hydrostatique total de la retenue. En cas de fuite, la partie du parement amont qui est exposée à l'eau ne représente qu'une petite partie de la surface qui serait exposée s'il n'y avait pas de DEG. Par ailleurs, la pression hydrostatique exercée reste moindre. Ainsi, le risque que de l'eau s'infilte dans le corps du barrage par le parement amont est considérablement réduit. En outre, l'infiltration de l'eau dans le système de drainage du DEG peut être due à des causes extérieures à la géomembrane. Elle peut par exemple provenir des fondations, des appuis, de la crête, de joints poreux, du parement aval, etc. Il serait ainsi prudent d'associer la mesure des fuites et de la pression hydrostatique de l'eau se trouvant derrière la géomembrane à un système qui contrôle l'intégrité de la géomembrane (fondé par exemple sur la détection géoélectrique).

Il est à noter que les fuites qui se produisent au niveau du DEG, donc au niveau du parement amont, n'ont rien à voir avec celles qui se produisent dans la galerie de drainage lorsqu'il n'y a pas de géomembrane. Théoriquement, le parement amont et tout le corps du barrage sont nettement plus secs avec un DEG, tout en provoquant dans la galerie de drainage un débit de fuite beaucoup plus élevé que celui qui serait observé en absence de géomembrane. Essayer de réduire le débit de fuite du DEG pour le rendre similaire à celui d'un modèle traditionnel sans géomembrane pourrait donner lieu à des travaux supplémentaires tels que des injections des fondations, un traitement des joints, la construction d'une nouvelle plinthe etc., comme indiqué dans les divers croquis conceptuels du chapitre 5, et discutés dans ce même chapitre. Il se peut que ces travaux supplémentaires entraînent une augmentation significative des coûts.

9.6. GARANTIE

Généralement, une garantie est demandée pour les matériaux, de même que pour l'installation. Un exemple de certificat de garantie classique est joint en Annexe 9.9.3.

Il est classique de demander une garantie de 10 ans pour les matériaux et une de 2 ans pour l'installation. En effet, une anomalie au niveau de l'installation sera visible dès le premier remplissage de la retenue d'eau, tandis que la dégradation des matériaux ne deviendrait visible qu'après un certain nombre d'années.

Dans certains cas, le maître d'ouvrage demande que l'installateur fasse une inspection de l'installation à intervalles périodiques pendant la période de garantie, comme par exemple chaque année, ou tous les deux, cinq ou dix ans après que l'installation a été achevée.

9.7. DEVIS QUANTITATIF ET CONDITIONS

Dans presque tous les projets d'étanchéité, des travaux de génie-civil pour les ouvrages périphériques et/ou préparatoires sont nécessaires ; ils sont indispensables

à la réalisation des travaux d'étanchéité, de même qu'à d'autres travaux comme ceux d'auscultation par exemple. Il est recommandé de regrouper les lots de travaux dans une section séparée du devis quantitatif, car généralement différents entrepreneurs/sous-traitants font des propositions de prix pour ces travaux, qui sont distribués sans cela dans les diverses sections du devis quantitatif.

Le découpage en sections doit couvrir les items suivants :

- Travaux de génie-civil préparatoires & pour ouvrages périphériques
- Accès au site et aux zones de stockage, alimentation électrique, alimentation en eau, évacuation des eaux usées, démolition et évacuation, nettoyage et mise en forme de la surface, préparation de la surface, traitement des joints (c'est-à-dire étanchéité, injection, nettoyage, etc.), rénovation des parties existantes (c'est-à-dire la crête, l'évacuateur de crues, etc.), construction d'éléments supplémentaires (c'est-à-dire la plinthe, l'écran d'injection, la galerie, le système de drainage, les sorties du système de drainage, etc.) de l'ouvrage
- Ouvrages périphériques en acier
- Vannes, robinets-vannes, etc.
- Travaux périphériques d'instrumentation pour l'auscultation
- Système de surveillance, capteurs, alimentation électrique, réalisation des mesures
- Travaux d'étanchéité

Revêtement, fixation, drainage, joint périphérique, conception.

En vue d'éventuelles adaptations techniques, chaque section doit comprendre la liste de tous les prix des matériaux, des frais de main d'œuvre et des frais généraux (mobilisation, démobilisation, gestion du site, assurances, etc.) en rapport à la réalisation complète et indépendante des travaux respectifs.

En général, une description détaillée des lots de travaux respectifs est nécessaire afin d'établir une comparaison claire entre les candidats à l'appel d'offre ainsi qu'une base fiable pour l'acceptation des travaux.

9.8. REMARQUES POUR CONCLURE

Les géomembranes sont maintenant très utilisées en ingénierie géotechnique, y compris pour les grands barrages. L'industrie géosynthétique a développé une large gamme de matériaux qui peuvent être utilisés dans de nombreux domaines pour le développement des barrages, particulièrement pour le drainage et le contrôle de l'infiltration. Ces matériaux permettent de réduire les coûts et le temps d'installation, surtout pour les nouveaux barrages et la remise en état des aménagements hydrauliques. Les techniques de revêtement traditionnel avec des matériaux rigides peuvent facilement perdre en efficacité après quelques années.

Malgré leurs nombreuses applications réussies, et même spectaculaires, les géomembranes ne sont pas magiques. Elles doivent être abordées comme tous les autres matériaux de construction. Elles doivent être soigneusement conçues et fabriquées, surtout quand elles sont appliquées à des barrages où une défaillance

pourrait avoir de graves conséquences. Comme indiqué dans les différentes sections de ce bulletin, divers aspects des aménagements des barrages nécessitent un très grand professionnalisme pour la conception et l'installation des géomembranes : liaison des systèmes de revêtement aux ouvrages rigides, système de drainage derrière la géomembrane, stabilité le long des interfaces sol-géosynthétiques ou géosynthétiques-géosynthétiques (par exemple en cas de couche de couverture dans un barrage en remblai), contraintes au moment de l'installation, contraintes causées par des tassements différentiels, ouverture des joints, contraintes dues au soulèvement par le vent dans le cas de géomembranes exposées, dilatation-contraction thermique de la géomembrane qui pourrait provoquer des ondulations ou des plis, et nuire à la durabilité de l'équipement, etc. Pendant la construction, des procédures strictes d'assurance qualité doivent être mises en place par des équipes qualifiées. De même qu'il est important pour les ingénieurs qui conçoivent les aménagements d'être au courant des nombreuses possibilités offertes par les géosynthétiques et surtout par les géomembranes, il est également important pour eux d'être conscients de l'attention minutieuse qu'il faut accorder à la conception lors de l'utilisation de géomembranes. En clair, il est essentiel de s'informer sur les géomembranes afin de concevoir et de construire de manière sûre des barrages intégrant ces dispositifs.

Il est très complexe d'appliquer des revêtements à des barrages en exploitation, surtout parce que les travaux de remise en état effectués nécessitent de vider la retenue et donc de d'affecter la ressource en eau de la population et des agriculteurs, la production d'énergie et la faune de la rivière en aval. La pose de la géomembrane sous l'eau permet la réparation des barrages sans en vider la retenue.

En général, il est recommandé d'étudier l'utilisation de revêtements flexibles afin de réduire le temps de construction et d'améliorer la qualité générale du revêtement d'étanchéité, surtout lorsque l'installation est réalisée dans un environnement défavorable, ou que les conditions d'exploitation sont difficiles.

Choisir les bons matériaux ainsi que des ingénieurs et installateurs expérimentés est la première chose à faire pour garantir l'efficacité d'un dispositif d'étanchéité utilisant des matériaux flexibles.

Le matériau d'étanchéité, c'est-à-dire la géomembrane, est l'un des éléments les moins coûteux du dispositif. La qualité, et non le prix, doit être le critère le plus important à prendre en considération au moment du choix. La sagesse de la citation suivante* s'applique particulièrement à ce matériau :

« Il n'est pas sage de payer trop cher, mais il est pire de payer trop peu.

Lorsque vous payez trop, vous perdez un peu d'argent, c'est tout.

Lorsque vous payez trop peu, il se peut que vous perdiez tout car ce que vous avez acheté n'est pas en mesure de remplir la fonction pour laquelle vous l'avez acheté ».

* H. Plusquellec : " Application of Geosynthetics in Irrigation and Drainage Projects " – International Commission on Irrigation and Drainage.

9.9. ANNEXES

9.9.1. Check List

Principales données nécessaires à l'élaboration d'un projet de dispositif d'étanchéité par géomembrane (plus le dossier sera renseigné, plus le projet sera adapté).

Check-list					
	Remblai	Béton Réhab.	BCR	Joints	Installation immergée
Généralités					
Nom et coordonnées complètes de la personne chargée de l'établissement du présent check list	X	X	X	X	X
Nom du projet	X	X	X	X	X
Nom du maître d'ouvrage	X	X	X	X	X
Nom de l'auteur du projet	X	X	X	X	X
Nom de l'entrepreneur	X	X	X	X	X
Localisation du site, grande ville/aéroport le plus près	X	X	X	X	X
Type de barrage, but principal	X	X	X	X	X
Durée prévue d'achèvement du projet de barrage (ouvrages neufs)	X		X		
Durée prévue avant le début des travaux (ouvrages neufs)	X		X		
Durée prévue jusqu'à l'achèvement des travaux du barrage (ouvrages neufs)	X		X		
Environnement					
Précipitation totale annuelle (en mm)	X	X	X	X	X
Distribution des précipitations (pluie/neige) : précipitation moyenne annuelle et répartition mensuelle, moyenne mensuelle (en mm)	X	X	X	X	X
Valeurs de la précipitation maximale sur 24 h (précipitation journalière). Maximum journalier pour chaque mois (en mm)	X	X	X	X	X
Manteau neigeux : épaisseurs maximales, distributions mensuelles	X	X	X	X	X

Check-list (suite)					
	Remblai	Béton Réhab.	BCR	Joints	Installation immergée
Glace : épaisseurs maximales, distributions mensuelles	X	X	X	X	X
Température ambiante : minimum et maximum pour chaque mois (°C/°F)	X	X	X	X	X
Humidité	X	X	X	X	X
Vents dominants	X	X	X	X	X
Valeur de la vitesse maximale des vents constatée	X	X	X	X	X
Valeur de la vitesse maximale des vents prise pour le projet	X	X	X	X	
Température de l'eau	X	X	X	X	X
Caractéristiques chimiques de l'eau, pH	X	X	X	X	X
Charge solide de l'eau	X	X	X	X	
Autres contraintes définies	X	X	X	X	X
Exploitation de la retenue (marnage sur cycle annuel)	X	X	X	X	X
Séisme maximal pris pour le projet, coefficient d'accélération et séisme de référence (exprimé sur l'échelle de Richter)	X	X	X	X	X
Données de base					
Hauteur maximale du barrage	X	X	X	X	X
Côte de la crête	X	X	X	X	X
Côte de la fondation (amont)	X	X	X	X	X
Longueur en crête	X	X	X	X	X
Largeur nette en crête (assez large pour passage d'un camion ?)	X	X	X	X	X
Hauteur du parapet	X	X	X	X	X
Inclinaison de la paroi amont	X	X	X	X	X
Existence et dimension du pulvino	X	X	X	X	X
Existence et dimension de la galerie de visite	X	X	X	X	X

Check-list (suite)					
	Remblai	Béton Réhab.	BCR	Joints	Installation immergée
Existence, types et dimensions des ouvertures dans le parement amont (par ex. vidange de fond)	X	X	X	X	X
Côte minimale de la galerie de visite	X	X	X	X	X
Type et emplacement du dispositif d'étanchéité de la fondation et des appuis (voile d'injection, tapis, etc...)	X	X	X	X	X
Surface nette de la paroi amont, en m ²	X	X	X	X	X
Valeur prévue du tassement de l'ouvrage	X	X	X	X	X
Valeur maximale prévue des rotations des plots du barrage	X	X	X	X	X
Description de la paroi amont	X	X	X	X	X
Description des différents types de formulations des bétons utilisés dans les différentes parties du barrage et dans le masque amont (BCR enrichi, béton enrichi, etc.)			X		
Dispositif d'étanchéité - Projet actuel					
Description du projet actuel, en précisant le type et les épaisseurs des couches	X		X	X	X
Type de joints (waterstop & drains forés, etc.)	X	X	X	X	X
Espacement des joints	X	X	X	X	X
Ouverture des joints : valeur maximale prévue (ouverture, rotation, tassement)	X	X	X	X	X
Délai prévu de réalisation du dispositif d'étanchéité (si celui-ci n'est pas construit en parallèle avec le corps du barrage)	X	X	X	X	X

Check-list (suite et fin)					
	Remblai	Béton Réhab.	BCR	Joints	Installation immergée
Dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG)					
Surface nette du géomembrane à installer sur le parement amont en m ²	X	X	X	X	X
Quels sont les avantages offerts par un DEG citer dans l'ordre de préférence (n° 1 le plus important)	X	X	X	X	X
• étanchéité	X	X	X	X	X
• coût réduit	X	X	X	X	X
• durée des travaux plus courte	X	X	X	X	X
• entretien réduit (couverture des fissures à prévoir)	X	X	X	X	X
• utilisation de matériaux non standard en substitution des matériaux usuels (argile, béton, béton enrichi, etc.) difficiles à trouver	X	X	X		
• résistance aux tremblements de terre	X	X	X	X	X
• construction plus simple	X	X	X	X	X
• refroidissement inutile			X		
Description du masque amont, notamment de la qualité de finition de la surface sur laquelle le DEG sera posé (planéité et rugosité, nids d'abeilles, éclats, béton, etc.)	X	X	X	X	X
Documents à fournir					
Plans (Autocad préféré), coupes principales, vue en plan et élévation amont, détails du pulvino, détails des ouvrages annexes et ouverture, détails des joints	X	X	X	X	X
– Rapport de fin de travaux	X	X	X	X	X
– Video	X	X	X	X	X
– Photos	X	X	X	X	X

9.9.2. Conformité aux instructions figurant dans le Dossier d'A.O.

Contenu du Dossier	Conformité du Soumissionnaire	Justifié par
Liste du # barrage(s) au moins (# mentionnés dans le dossier de soumission) équipés du DEG proposé, dont certains seront des barrages du même type (béton, remblai, BCR, etc)	Liste de tous les projets installés sur des barrages du même type, en précisant: type de matériaux géosynthétique, drainage, quantités mises en œuvre, années d'installation, coordonnées complètes du Maître d'ouvrage ou de son représentant à même de confirmer ces déclarations, etc.	Soumissionnaire
Parmi les barrages cités en référence, un au moins présentera une hauteur égale à 70 % de la hauteur du barrage objet du présent appel d'offre	Dossier de réception ou équivalent	Maître d'Ouvrage / son Représentant / Maître d'œuvre
Parmi les barrages cités en référence, un au moins présentera une surface de masque amont ≥ 50 % de la surface correspondante du barrage objet du présent appel d'offre	Dossier de réception ou équivalent	Maître d'Ouvrage/ son Représentant / Maître d'œuvre
Parmi les barrages cités en référence, un au moins aura atteint une cadence de mise en place du DEG ≥ 70 % de la cadence nécessaire pour le barrage objet du présent appel d'offre (unités : mètres carrés / mois)	Dossier de réception ou équivalent	Maître d'Ouvrage/ son Représentant / Maître d'œuvre
Parmi les barrages cités en référence, un au moins partagera les mêmes caractéristiques (matériau du DEG, système de fixation) que celles proposées pour le barrage objet du présent appel d'offre, et qui auront fonctionné depuis au moins dix ans sans problèmes	Dossier de réception ou équivalent et déclaration après 10 ans en exploitation	Maître d'Ouvrage/ son Représentant / Maître d'œuvre prestataires indépendants
Parmi les barrages cités en référence, un au moins ayant les mêmes caractéristiques (matériau du DEG, système de fixation) que celles proposées pour le barrage objet du présent appel d'offre, sera en place depuis 3 ans au plus	Dossier de réception ou équivalent.	Maître d'Ouvrage/ son Représentant / Maître d'œuvre

9.9.3. Exemple de Garantie

Relecture effectuée par : M. Donald J. Weiss
Conseil Général auprès GSI

ABC COMPANY INC.
GARANTIE LIMITÉE
ABC COMPANY
Adresse
Téléphone

Police n° : 102-2003

Project : Barrage XYZ

Date d'entrée en vigueur : Réception provisoire du système ABC prononcée par le CLIENT

NOM ACHETEUR POUR LE CLIENT NOM PROJET BARRAGE XYZ.....

ADRESSE ADRESSE PROJECT

VILLE-ETAT-CODE POSTAL-PAYS..... VILLE-ETAT-CODE POSTAL-PAYS

GEOMEMBRANE – TYPE - DESCRIPTION : PQR 1234 destiné au
DEG (intégrant dispositif de drainage par géomembrane)

ABC COMPANY Inc. garantit et certifie que le dispositif réalisé au barrage XYZ par ABC COMPANY Inc est sans vices de fabrication (au sens de la définition donnée dans le cahier de charges techniques contractuelles) et sans vice de mise en œuvre; et que ce dispositif pourra résister aux intempéries et aux conditions d'exploitation normales pour une période de 730 jours (2 ans) à compter de la date d'entrée en vigueur du Contrat.

Cette Garantie Limitée ne couvre pas les dommages ou défauts que pourrait subir le géomembrane PQR par suite de Force Majeure, blessures ou catastrophes telles que (liste non limitative) : séismes, inondations, grêlons poinçonnant, tornades, Force Majeure. Les mots "exploitation normale" tels que définis ici excluent l'attaque par des matières chimiques agressives, l'abus des membranes PQR par les machines, équipements ou personnes, emplacement mal préparé ou matériaux de couverture délétères, pressions ou efforts excessifs, quelle qu'en soit la provenance. Il est expressément convenu entre les partis que le matériel vendu au titre du présent document est destiné uniquement à un usage commercial ou industriel.

En cas de défauts de matière ou d'installation ou perte précoce de jouissance selon les termes de la Garantie Limitée ci-dessus, ABC COMPANY Inc s'engage à réparer ou à remplacer la membrane PQR sans frais pour l'Acheteur pendant la durée de la période de garantie. ABC COMPANY Inc pourra visiter pour déterminer les causes des défauts invoqués et prendre les mesures nécessaires pour réparer ou remplacer le géomembrane PQR s'il existe un défaut couvert par la présente garantie. La présente Garantie s'applique exclusivement aux prestations de ABC COMPANY Inc. (fourniture et installation de la géomembrane), celles de ses sous-traitants et ne couvre pas l'installation du géomembrane par les tiers.

Plus précisément, ABC COMPANY Inc. certifie qu'elle a accepté l'état de surface (rugosité) du barrage en BCR de XYZ et affirme que le dispositif ne sera pas compromis sur le critère de la rugosité superficielle du substrat. Cependant,

ABC COMPANY Inc n'indemniser pas la destruction de la membrane si le support en BCR de XYZ s'affaisse, se rompt ou est instable.

ABC COMPANY Inc garantit que le débit d'eau passant par les drains du dispositif de drainage par géomembrane n'excédera pas une valeur totale de X galons/minute or X/3 gpm pour un drain. Cette valeur intègre toutes les eaux entrant dans le dispositif de drainage via le géomembrane, les profilés ou étanchéités périmétrales. Cependant, ABC COMPANY Inc. ne garantie pas l'eau du dispositif provenant d'en-dessous du pulvino, des joints du pulvino, ou de fissures dans le barrage en BCR passant au-delà du dispositif d'étanchement. De plus, les eaux sortant de la zone en-dessous du joint secondaire ne sont pas comptabilisées dans les valeurs limites de X gpm et X/3 gpm.

Toute revendication concernant un supposé manquement à cette garantie fera l'objet d'une mise en demeure par lettre recommandée avec accusé de réception adressée au Président, ABC Company Inc. [adresse, téléphone] dans les soixante (60) jours de la date de l'existence du défaut supposé, faute de quoi, l'Acheteur est réputé désister de tout recours concernant le défaut supposé ainsi que les indemnités correspondantes ; il perd tous droits conférés par ladite garantie concernant le défaut en question. ABC COMPANY Inc. doit effectuer les Remplacements et Réparations Provisoires dus au titre de la présente Garantie quelles que soient les conditions au chantier et l'accessibilité du site du défaut supposé. ABC COMPANY Inc. ne sera pas obligée d'effectuer des Remplacements ou Réparations Définitifs au titre de la présente Garantie tant que la zone des travaux ne soit propre, sèche et dégagée, par ex.(liste non limitative) : sur la zone mise à disposition pour les travaux de réparation ou de remplacement du géomembrane PQR: absence de saletés, boue, résidus liquides de toute nature. Si, après visite, il s'avère qu'aucun recours n'est possible au titre de la présente Garantie Limitée, alors, pour les deux premières visites injustifiées, l'Acheteur remboursera à ABC COMPANY Inc 50 % des coûts engagés par celui-ci pour la visite injustifiée de la zone prévue pour les travaux (garantie 102-2003). Pour toute visite injustifiée suivante, l'Acheteur remboursera l'intégralité de ces coûts. Aucun remboursement ne sera dû pour les visites justifiées.

Si le Remède Exclusif ou Installation prévu par la Présente Garantie échoue pour ce qu'il en est de son action principale – et seulement dans ce cas – l'Acheteur pourra exiger le remboursement du prix d'achat partiel correspondant à la fraction du matériel ou de l'installation censée, d'un commun accord, non conforme aux exigences contractuelles. ABC COMPANY Inc. ne sera pas redevable pour d'autres dommages (directes, indirectes, spéciaux, consécutifs ou secondaires) éventuellement liés à la défaillance. ABC COMPANY Inc. ne sera pas obligée de rembourser à l'Acheteur quelques réparations, remplacements, modifications ou changements que ce soit, effectués par l'ACHETEUR avant de recevoir la note de service autorisant de tels travaux. Les indemnités éventuellement payables par ABC COMPANY Inc ne pourront dépasser le coût de remplacement (matériaux et main-d'œuvre) du dispositif d'origine.

ABC COMPANY Inc ne prévoit déléguer ni ne délègue à quelque personne que ce soit (autre que le signataire ci-dessous, représentant la société ABC COMPANY Inc) le pouvoir d'engager au nom de la société toute autre obligation concernant le géomembrane XYZ réalisé sur la base de la présente Garantie

Limitée. La Garantie Limitée concernant le dispositif d'étanchéité XYZ ci-dessus remplace toutes autres garanties possibles implicites ou explicites et en choisissant la présente Garantie Limitée, l'ACHETEUR rejette toutes les autres garanties possibles, à l'exception de celles spécifiquement mentionnées.

La Garantie Limitée couvre l'acheteur / maître-d'ouvrage; elle est cessible et transférable au profit des ayant-droit de l'acheteur.

L'ACHETEUR reconnaît par acceptation que la présente Garantie Limitée est acceptée en préférences à toutes autres possibles garanties sur matériaux.

La Société ABC Inc ne donne aucune garantie autre que celle décrite ci-dessus et refuse par exemple toute implication de garantie de qualité marchande ou d'aptitude à une fonction spécifique. La garantie définie ci-dessus est la seule garantie applicable à la prestation (matériaux et main-d'œuvre) visée ci-dessus et ABC COMPANY Inc refuse toute responsabilité envers les tiers (personne morale ou physique) qui pourrait éventuellement émettre des garanties par voie écrite ou orale.

La Garantie Limitée de la COMPANY ABC Inc. devient ainsi une obligation pour cette Société de n'agir aux termes de la Garantie qu'après liquidation du contrat

Je déclare avoir lu et compris le texte ci-dessus, en foi de quoi j'apporte ma signature ci-dessous

DATE

NOM DE L'ACHETEUR.....

ABC COMPANY
INC.....

SIGNATURE.....

*Président
ou Représentant habilité*

FONCTION

Témoin ce jour le 200x

**TECHNICAL SOLUTIONS/GEOMEMBRANES ADOPTED
IN THE CITED EXAMPLES**

***SOLUTION TECHNIQUES/GÉOMEMBRANES UTILISÉES DANS LES
EXEMPLES CITÉS:***

Figures 4.6.2a: Sibelon CNT 2150 and Sibelon C 1950 for Carpi
Figures 4.6.2a: Sibelon CNT 2150 et Sibelon C 1950 pour Carpi

Figures 4.6.3: Sibelon CNT 4600 for Carpi
Figures 4.6.3: Sibelon CNT 4600 pour Carpi

Figures 4.6.5, 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3, 5.6.5, 6.6.1, 6.6.2, 7.6.1, 7.6.2, 7.6.3, 7.6.4, 7.6.5:
Sibelon CNT 3750 and Sibelon C 3250 for Carpi

*Figures 4.6.5, 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3, 5.6.5, 6.6.1, 6.6.2, 7.6.1, 7.6.2, 7.6.3, 7.6.4, 7.6.5:
Sibelon CNT 3750 et Sibelon C 3250 pour Carpi*

Figures 4.6.2b and 6.6.2 : Sibelon CNT 4400 for Carpi
Figures 4.6.2b et 6.6.2 : Sibelon CNT 4400 pour Carpi

Figures 6.6.3: Sibelon CNT 2800 for Carpi
Figures 6.6.3: Sibelon CNT 2800 pour Carpi

Patents cited

Brevets mentionnés:

Carpi/Sibelon: 4.3.6.2, 4.5.1, 4.6.2, 5.5.2, 5.4.6.1, 5.4.7, 6.2, 6.2.1, 6.4.6, 7.3.1 & Figures
63, 4.6.5, 81, 83, 84, 85, 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3, 5.6.5, 111, 118, 119, 6.6.1, 6.6.2, 6.6.3, 132,
7.6.1, 7.6.2, 7.6.3, 7.6.4, 7.6.5.

Winchester: 6.2.3, 6.5.2 & Figures 6.9, 6.6.3.

Imprimerie de Montligeon
61400 St Hilaire le Châtel
Dépôt légal : Mai 2010
N° 25192
ISSN 0534-8293



INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS
COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES
151, boulevard Haussmann - 75008 Paris - France
Téléphone : (33) 01 53 75 16 52 - Fax : (33) 01 40 42 60 71
<http://www.icold-cigb.org/>