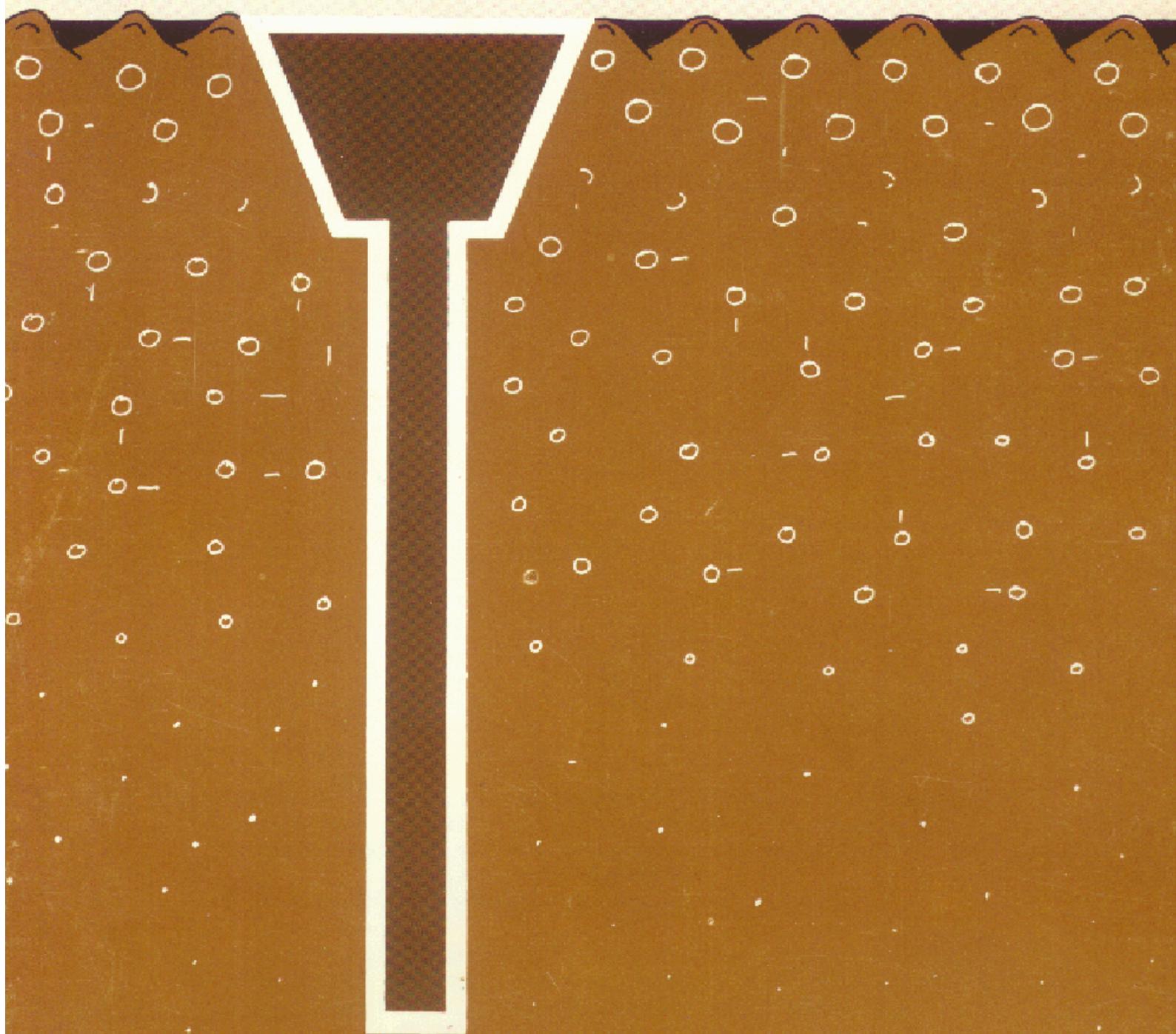


# FILLING MATERIALS FOR WATERTIGHT CUT OFF WALLS

## MATERIAUX DE REMPLISSAGE POUR COUPURES ÉTANCHES



**BULLETIN 51  
1985**



*Report prepared by G. Y. Fenoux (Soletanche) with the co-operation  
of Messrs. de Paoli (Rodio), Dupeuple (Bachy), Dietrich (ICOS),  
Gouvenot (Soletanche), Habib (Ecole Polytechnique)  
and Pedroni (ENEL-CRIS)  
for the Committee on Materials for Fill Dams*

**Rapport préparé par G. Y. Fenoux (Soletanche) avec la coopération  
de MM. de Paoli (Rodio), Dupeuple (Bachy), Dietrich (ICOS),  
Gouvenot (Soletanche), Habib (École Polytechnique)  
et Pedroni (ENEL-CRIS)  
pour le Comité des Matériaux pour Barrages en Remblai**

**FILLING MATERIALS  
FOR WATERTIGHT CUT OFF WALLS**

**MATERIAUX DE REMPLISSAGE  
POUR COUPURES ÉTANCHES**



**BULLETIN 51  
1985**

**AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:**

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

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 et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

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 referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

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 and to apply accurately the recommendations to any particular case.

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.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---



---

## TABLE OF CONTENTS

---

<p><b>INTRODUCTION</b></p> <p><b>1. GÉNÉRALITÉS</b></p> <p>1.1. Les écrans d'étanchéité <b>6/7</b></p> <p style="padding-left: 20px;">1.1.1. Paroi à la bentonite ou « slurry trench » <b>6/7</b></p> <p style="padding-left: 20px;">1.1.2. Paroi en béton rigide ou plastique <b>6/7</b></p> <p style="padding-left: 20px;">1.1.3. Paroi en coulis <b>6/7</b></p> <p>1.2. Critères de choix des matériaux <b>8/9</b></p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.1. Exigences liées à l'ouvrage <b>8/9</b></p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.2. Conditions liées à l'environnement <b>12/13</b></p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.3. Conditions pratiques locales <b>14/15</b></p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.4. Conclusions <b>14/15</b></p> <p><b>2. DESCRIPTION DES MATÉRIAUX USUELS</b></p> <p>2.1. Produits de base <b>16/17</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.1.1. Les argiles <b>16/17</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.1.2. Les ciments <b>20/21</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.1.3. Les adjuvants <b>22/23</b></p> <p>2.2. Le béton classique <b>24/25</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.2.1. Barrages neufs <b>24/25</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.2.2. Réfection d'ouvrages <b>24/25</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.2.3. Composition <b>24/25</b></p> <p>2.3. Conglomerats plastiques <b>26/27</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.1. Principe <b>26/27</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.2. Mortiers et bétons plastiques <b>26/27</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.3. Coulis autodurcissables <b>28/29</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.4. Déformabilité des conglomerats plastiques <b>32/33</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.5. Résistance des conglomerats plastiques <b>36/37</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.6. Perméabilité <b>36/37</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.7. Pérennité <b>38/39</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.8. Érodabilité <b>40/41</b></p> <p>2.4. Slurry trench <b>40/41</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.4.1. Composition <b>40/41</b></p> <p style="padding-left: 20px;">2.4.2. Perméabilité <b>40/41</b></p>	<p><b>5 INTRODUCTION</b></p> <p><b>1. GENERAL</b></p> <p>1.1. Watertight curtain walls</p> <p style="padding-left: 20px;">1.1.1. Slurry trench</p> <p style="padding-left: 20px;">1.1.2. Diaphragm wall using rigid or plastic concrete</p> <p style="padding-left: 20px;">1.1.3. Grout diaphragm walls</p> <p>1.2. Criteria for choice of materials</p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.1. Requirements relating to the structure</p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.2. Ground conditions</p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.3. Local conditions</p> <p style="padding-left: 20px;">1.2.4. Conclusions</p> <p><b>2. DESCRIPTION OF THE USUAL MATERIALS</b></p> <p>2.1. Basic products</p> <p style="padding-left: 20px;">2.1.1. Clays</p> <p style="padding-left: 20px;">2.1.2. Cements</p> <p style="padding-left: 20px;">2.1.3. Admixtures</p> <p>2.2. Conventional concrete</p> <p style="padding-left: 20px;">2.2.1. New dams</p> <p style="padding-left: 20px;">2.2.2. Restoration of structures</p> <p style="padding-left: 20px;">2.2.3. Composition</p> <p>2.3. Plastic conglomerates</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.1. Principle</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.2. Plastic concretes and mortars</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.3. Self-hardening grouts</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.4. Deformability of plastic conglomerates</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.5. Strength of plastic conglomerates</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.6. Permeability</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.7. Durability</p> <p style="padding-left: 20px;">2.3.8. Erodibility</p> <p>2.4. Slurry trench</p> <p style="padding-left: 20px;">2.4.1. Composition</p> <p style="padding-left: 20px;">2.4.2. Permeability</p>
---	---

---

<b>3. MISE EN ŒUVRE</b>	<b>42/43</b>	<b>3. EXECUTION</b>
3.1. Fabrication et mise en œuvre	42/43	3.1. Production and execution
3.1.1. Préparation des coulis bentonite-ciment	42/43	3.1.1. Preparation of the bentonite-cement grout
3.1.2. Préparation des conglomerats plastiques	42/43	3.1.2. Preparation of plastic conglomerates
3.1.3. Autre mode de préparation des conglomerats plastiques	42/43	3.1.3. Other method of preparation for plastic conglomerates
3.1.4. Slurry trench	42/43	3.1.4. Slurry trench
3.2. Points particuliers	44/45	3.2. Special points
3.2.1. Épaisseur de la paroi	44/45	3.2.1. Thickness of the diaphragm
3.2.2. Raccordement en profondeur	44/45	3.2.2. Bond at depth
3.2.3. Raccordement en tête	44/45	3.2.3. Bonding at the top
<b>4. CONTRÔLES</b>	<b>46/47</b>	<b>4. CHECKING AND CONTROLS</b>
4.1. Déroulement des contrôles - Généralités	46/47	4.1. General
4.2. Contrôle de la fabrication	46/47	4.2. Production
4.2.1. Fonctionnement de la centrale de fabrication	46/47	4.2.1. Functioning of the production plant
4.2.2. Contrôle des matériaux	46/47	4.2.2. Checking of materials
4.2.3. Contrôle du coulis frais	48/49	4.2.3. Checking of fresh grout
4.3. Essais sur matériau durci	50/51	4.3. Tests on the hardened material
4.3.1. Résistance en compression simple	50/51	4.3.1. Crushing strength
4.3.2. Résistance en compression triaxiale	50/51	4.3.2. Triaxial compressive strength
4.3.3. Perméabilité	50/51	4.3.3. Permeability
4.3.4. Érodabilité	50/51	4.3.4. Erodibility
4.4. Contrôles in situ	52/53	4.4. Instrumentation for observation of cut off wall behaviour
4.4.1. Déformation de l'ouvrage	52/53	4.4.1. Deformation of the structure
4.4.2. Niveaux piézométriques	52/53	4.4.2. Piezometric levels
<b>ANNEXES</b>	<b>55/56</b>	<b>APPENDICES</b>

---

## INTRODUCTION

---

Un barrage étant rarement fondé sur un massif parfaitement étanche, il existe pratiquement toujours un écoulement souterrain. Le débit de cet écoulement conditionne la rentabilité de la retenue ; sa pression et son gradient de sortie peuvent même mettre en péril la pérennité de l'ouvrage.

Naturellement, de nombreux dispositifs ont été employés pour résoudre ces problèmes : tapis, drainage, écran d'étanchéité. Parmi ceux-ci, l'utilisation de la technique des parois moulées dans le sol pour l'exécution d'écrans étanches a connu un développement considérable depuis une vingtaine d'années. Ceci est dû principalement à la possibilité, parmi les différents types de matériaux de remplissage de ces écrans, d'ajuster leur composition.

Le rapport suivant a été fait avec l'objectif principal de permettre une meilleure compréhension entre les fabricants de coupures étanches, et les utilisateurs (Maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre ou concepteurs). Il ne s'agit donc pas, et cela s'avérerait pratiquement impossible, de faire un exposé complet sur toutes les connaissances techniques concernant les coupures étanches.

En bref, ce n'est pas un « do it yourself », mais nous espérons que son utilité ne pourra être contestée et nous souhaitons qu'il rencontre un accueil favorable auprès des fabricants, des utilisateurs et des concepteurs.

---

## INTRODUCTION

---

Because a dam is rarely founded on a perfectly watertight ground mass, there is nearly always underground water flow. The discharge of this seepage affects the profitability of the dam ; its pressure and exit gradient can endanger the permanence of the structure itself.

Naturally, numerous techniques have been employed to resolve these problems : impervious blankets, drains, waterproof curtains. Amongst these, the use of the cast-in-place diaphragm wall technique to make watertight curtain walls has been considerably developed during the last twenty years. This is due principally to the possibility of adjusting the composition with different types of filling materials.

The main aim of the following report is to allow a better understanding between the constructor of the cut off wall, the users and the designers.

It is not, therefore, a question of a complete exposition of all the known techniques concerning watertight cut off walls, which would prove practically impossible.

In brief, this is not a « do it yourself », but we hope that its usefulness will not be disputed, and that it is favourably received by constructors, users and designers.

---

# 1. GÉNÉRALITÉS

---

## 1.1. LES ÉCRANS D'ÉTANCHÉITÉ

Ne seront traitées ici que les parois en béton rigide, en béton plastique, en coulis et à la bentonite : ce sont des écrans épais. Nous rappelons schématiquement leur exécution.

### 1.1.1. Paroi à la bentonite ou « slurry trench » (Fig. 1)

Ce type d'écran, surtout utilisé en Amérique du Nord, consiste en une paroi forée en continu au moyen d'une drague, d'une pelle, d'une benne, sous boue bentonitique, puis remblayée à l'aide d'un mélange d'agrégats et de boue de forage. Généralement on utilise des agrégats issus de la perforation soit seuls, soit additionnés d'autres matériaux choisis pour obtenir un profil granulométrique convenable.

Cette technique nécessite une largeur de tranchée importante (1,5 m à 3 m) pour assurer une coupure efficace et reste limitée aux profondeurs moyennes (25 m). En outre, la liaison avec un substratum rocheux constitue un problème délicat.

### 1.1.2. Paroi en béton rigide ou plastique (Fig. 2)

Il s'agit d'une paroi moulée classique perforée sous boue bentonitique et bétonnée à la colonne plongeuse avec un béton plastique contenant de l'argile ou avec un béton ordinaire. On opère par panneaux alternés, les liaisons étant faites au tube-joint pour le béton ordinaire.

On peut atteindre de grandes profondeurs (plus de 50 m). L'épaisseur est généralement de 0,60 m. Toutefois, pour limiter le risque de fenêtres au droit des joints dues aux déviations inhérentes au procédé, il est prudent d'augmenter l'épaisseur (1 m à 1,20 m) des parois très profondes.

### 1.1.3. Paroi au coulis (Fig. 3)

Il s'agit d'une paroi moulée, d'épaisseur comprise entre 0,50 m et 1,50 m, perforée à l'aide d'une boue de forage spéciale, qui fait prise en quelques heures et sert directement de matériau d'étanchéité. On travaille « en continu », le coulis frais et le coulis chargé de sédiments de perforation se mélangeant sans solution de continuité.

Outre une simplification allant dans le sens de l'économie, cette technique présente les avantages suivants :

- suppression des joints : un débit de fuite à travers un joint défectueux peut être supérieur à celui existant pour tout le reste de la paroi;

---

# 1. GENERAL

---

## 1.1. WATERTIGHT CUT OFF WALL

Consideration will only be given to thick diaphragm walls in rigid concrete, plastic concrete and bentonite grout. Their construction is described with the help of the figures.

### 1.1.1. Slurry trench (Fig. 1)

This type of curtain wall, used especially in North America, consists of a continuous diaphragm wall, excavated by means of a backhoe, drag bucket or clamshell, under bentonite slurry, then refilled with slurry impregnated aggregates often composed of suitably graded sand and gravel from the excavation. Thorough mixing of the aggregates and slurry is necessary before deposition in the trench.

This technique requires a significant width of trench (1.5 m to 3 m) to ensure an effective cut off, and is limited to moderate depths of about 25 m. Also, the joint with a rock substratum may present some difficulties.

### 1.1.2. Diaphragm wall using rigid or plastic concrete (Fig. 2)

This is a typical cast-in-place diaphragm wall, excavated under bentonite slurry and concreted, by tremie pipe, with plastic concrete containing clay or with normal concrete. It is carried out in alternate panels, the joints being made by stop-end tubes for normal concrete.

Great depths may be attained (more than 50 m). The wall thickness is generally 0.60 m. To reduce the risk of gaps in the line of the joints, due to deviations inherent in the process, it is always wise to increase the thickness (1 m to 1.2 m) for very deep walls.

### 1.1.3. Grout diaphragm walls (Fig. 3)

This is a cast-in-place wall, of thickness between 0.5 m and 1.5 m, excavated with the aid of a cementitious bentonite slurry referred to as grout, which sets in a few hours and serves directly as the waterproofing material. Work is carried out continuously. The fresh grout mixes with the grout bearing sediments in the excavation, without any discontinuity.

A further simplification in the direction of economy, this technique presents the following advantages :

- obviates the need of stop end joints : the flow from a leak through a defective joint may be greater than that for all rest of the wall;

- pendant la perforation, dans un milieu perméable, le coulis injecte littéralement le terrain. Ainsi, après la prise, il participe efficacement à la sécurité de l'ouvrage, tout en minimisant les conséquences des déviations éventuelles à grande profondeur.

Par contre, un tel coulis est délicat à mettre au point, sa fabrication et sa mise en œuvre sur chantier devront être surveillées attentivement, afin d'obtenir un matériau homogène ayant les caractéristiques requises.

## 1.2. CRITÈRES DE CHOIX DES MATÉRIAUX

Le rôle des matériaux est de constituer un écran capable de maintenir l'écoulement souterrain à un niveau raisonnable pendant toute la durée de la vie de l'ouvrage. Ils doivent, de ce fait, satisfaire à un certain nombre d'exigences, de critères ou de conditions.

### 1.2.1. Exigences liées à l'ouvrage

#### 1.2.1.1. Débit résiduel

Le rôle d'un écran est rarement de stopper totalement tout écoulement sous le barrage, mais simplement d'éviter que celui-ci ait un débit trop élevé. C'est pourquoi, dans ce cas, la perméabilité en grand dépend d'une part des propriétés intrinsèques du matériau, mais surtout de l'existence éventuelle de « gros défauts » tels que :

- discontinuité de l'écran (fissuration, ouverture des joints);
- mauvais encastrement dans le substratum peu perméable.

En outre, il convient de distinguer :

- les perméabilités sur l'échantillon à l'échelle de quelques centimètres cubes mesurées en laboratoire;
- les perméabilités à l'échelle des fouilles ou « perméabilités en grand » qui intéressent plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés obtenues par essais de pompage *in situ*.

En pratique, un ordre de grandeur des perméabilités en grand serait :

- coulis :  $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  m/s;
  - béton plastique :  $10^{-8}$  à  $10^{-9}$  m/s;
  - béton classique :  $10^{-9}$  à  $10^{-10}$  m/s;
- (rappel : voile injecté :  $10^{-6}$  m/s).

#### 1.2.1.2. Déformations

Dans son ensemble, le barrage va subir :

- des déformations dues au tassement de la digue sous son poids propre et aux déformations des couches d'assise sous le poids de la digue;
- des déflexions horizontales et verticales provoquées par les efforts dues à la première mise en eau, puis par les efforts alternés liés à l'exploitation de la retenue.

- during excavation in a permeable medium, the ground is literally grouted. Thus, after setting, it improves the safety of the structure by minimising the effects of possible deviations at great depth.

On the other hand, such a grout is delicate to place; its production and use on site must be closely supervised, so as to obtain a homogeneous material having the required characteristics.

## 1.2. CRITERIA FOR THE CHOICE OF MATERIALS

The role of the materials is to make a curtain capable of controlling seepage to a reasonable level throughout the life of the structure. They must, then, satisfy a certain number of requirements, criteria or conditions.

### 1.2.1. Requirements relating to the structure

#### 1.2.1.1. Residual discharge

The task of the curtain is rarely to completely stop all the seepage under the dam, but simply to prevent excessively high discharges. The overall permeability of the curtain depends partly on the intrinsic properties of the material, and partly on the possible existence of major flaws such as :

- discontinuities of the curtain wall (cracking, opening of joints);
- poor embedment in the substratum of low permeability.

Furthermore, it is advisable to ascertain :

- permeabilities by conducting laboratory tests on large samples of the curtain material;
- permeabilities by conducting field permeability test such as a pumping test on a large scale.

In practice, the overall permeabilities will be of the order of :

- $10^{-7}$  to  $10^{-8}$  m/s for grout;
  - $10^{-8}$  to  $10^{-9}$  m/s for plastic concrete;
  - $10^{-9}$  to  $10^{-10}$  m/s for normal concrete;
- ... to compare with :  $10^{-6}$  m/s for grout curtain.

#### 1.2.1.2. Deformations

As a whole, the wall will undergo :

- the deformations due to the settlement of the dam under its own weight, and to the settlement and deflections of the foundation beds under the weight of the dam;
- the horizontal and vertical deflections due to the first filling with water and then to the alternating loads related to the use of the reservoir.

Ainsi donc pour remplir son rôle avec succès, l'écran doit être capable de résister aux déformations qui lui sont imposées, sans fissures, ouvertures de joints entre panneaux, et de toute façon sans réduction de l'étanchéité. On cherche donc un matériau susceptible de suivre sans se désorganiser les déformations imposées par le sol.

La solution idéale consiste en un matériau présentant des caractéristiques de déformations très voisines de celles du sol encaissant.

Toutefois, dans le cas d'un sol homogène, ou lorsque les variations du module d'Young sont faibles avec la profondeur, on peut démontrer qu'un matériau dont le module est 4 à 5 fois supérieur à celui du sol convient.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluer le comportement réel d'une paroi :

- méthode « élastoplastique » ;
- méthode par « éléments finis ».

La méthode élastoplastique est basée sur le principe du module de réaction du sol, avec une loi de comportement des matériaux distinguant les stades élastique, puis plastique, non réversible.

Certains cas de configuration méritent une analyse plus fine : couche molle intercalée, écran situé au pied amont de la digue, par exemple.

#### *1.2.1.3. Résistance en compression du matériau durci*

Ces écrans n'ayant pas de rôle porteur, on ne recherche généralement pas une grande résistance. Au contraire, afin d'obtenir un matériau ayant une déformabilité élevée, on devra choisir une résistance en compression la plus faible possible. Il est donc logique que les cahiers des charges imposent une résistance maximale de quelques bars. Les matériaux auront des C/E faibles par rapport aux bétons traditionnels, inférieurs à 0,5.

Toutefois, il faut que les matériaux aient une résistance suffisante pour :

- supporter le poids de l'ouvrage ;
- résister aux contraintes du sol en profondeur ;
- résister à l'érosion : pour les ouvrages définitifs dont font généralement partie les écrans de barrage, la notion de perméabilité est complétée par celle d'érodabilité, c'est-à-dire, la résistance du matériau vis-à-vis d'écoulement sous fort gradient. Des essais ont montré que la résistance à l'érosion était liée à la résistance en compression simple. Avec les écrans considérés, du fait de leur épaisseur, les gradients sont élevés. On a recours à des essais en laboratoire (pin-hole test : voir paragraphe 4.3.4) pour vérifier le comportement.

#### *1.2.1.4. Fracturation hydraulique*

Il n'y a pas risque de fracturation hydraulique lorsque les contraintes horizontales et verticales, dans le plan de l'écran, sont supérieures à la pression de l'eau au niveau considéré : si une fissure transversale à l'écran, verticale ou horizontale se crée sur le parement amont, elle aura tendance à se refermer.

Différentes implantations de l'écran sont possibles :

- la paroi peut être forée sensiblement dans l'axe de l'ouvrage :
- I. soit depuis le couronnement, c'est-à-dire après construction de la digue (c'est le cas notamment des réparations d'étanchéité) ;

Thus to be successful, the curtain wall must be able to endure the deformations which are imposed upon it without crackins, opening joints between panels, or in any way decrease its watertightness. A material is required that is able to follow the deformations imposed on the soil without breaking up.

The ideal solution consists of a material presenting the deformation characteristics very similar to those of the surrounding soil.

However, in the case of a homogeneous soil, or when the variations of Young's modulus with depth are slight, a material having a modulus 4 to 5 times greater than the soil is suitable.

There are several methods to assess the actual behaviour of a diaphragm wall :

- the elastoplastic method;
- the finite element method.

The elastoplastic method is based on the principle of the soils modulus of reaction, with a material behaviour law distinguishing the elastic, then non-reversible plastic, stages.

Certain configurations merit a finer analysis : soft beds interspersed, curtain wall at the heel of the dam, for example.

#### *1.2.1.3. Compressive strength of the hardened material*

In general, great strength is not sought because these cut off walls do not have a load carrying role. On the contrary, in order to obtain a material having a high deformability, the lowest compressive strength possible must be chosen. It is therefore logical that the specifications impose a maximum strength of several bars. The materials will have low cement/water (C/W) ratios with respect to traditional concretes, less than 0.5.

However, the materials must have adequate strength to :

- support the weight of the structure;
- resist the soil stresses at depth;
- resist erosion : for the final structures which are generally part of the curtain wall of the dam, the concept of permeability must be balanced against that of erodibility, that is the resistance of the material with respect to seepage under a considerable hydraulic gradient. Tests have shown that resistance to erosion is related to the strength in simple compression. With the curtain walls considered, due to their thinness the gradients are high. One has recourse to laboratory tests (pin-hole test, see 4.3.4.) to verify the behaviour.

#### *1.2.1.4. Hydraulic fracturing*

There is no risk of hydraulic fracturing when the horizontal and vertical stresses in the plane of the curtain wall are greater than the water pressure at the level considered : if a crack through the curtain wall, horizontal or vertical, is created on the upstream face, it will have a tendency to close itself.

Various positions may be chosen for a curtain wall :

- the diaphragm wall may be placed sensibly in the axis of the structure :
- I. either from the dam crest after construction of an earth dam (notably in the case of repairs to improve watertightness);

II. soit avant construction de la digue, au niveau de sa base,

III. la paroi peut être implantée en pied de talus amont en parafouille (Fig. 22).

On démontre pour les cas I et II qu'il n'y a pas de risque de fracturation hydraulique et ceci s'est trouvé confirmé par l'expérience. Par contre, pour les parafouilles III, les contraintes induites par la construction de la digue sont inférieures à la pression de l'eau. Diverses possibilités sont à considérer :

- emploi d'un matériau ayant une résistance à la traction de l'ordre de 200 à 300 kPa;
- renforcement de la partie haute de la paroi au moyen d'ouvrages résistant efficacement à la traction (voir 3.2.3.);
- injection des joints pour retarder leur ouverture.

### 1.2.2. Conditions liées à l'environnement

Pratiquement tous les sols conviennent, mais leur nature influencera directement ou indirectement le choix du matériau le plus adapté ainsi que sa composition.

#### 1.2.2.1. Caractéristiques géologiques et physiques des sols

Dans les terrains très perméables ( $> 10^{-3}$  m/s) les fuites de coulis ont pour effet d'injecter le sol. Le phénomène peut être contrôlé avec des coulis de composition bien étudiée.

Toujours dans le cas des coulis autodurcissables, de nombreux terrains (argile, marne, craie) augmentent le pourcentage de matière sèche du matériau. Ceci provoque un épaissement et, généralement, une augmentation des résistances finales. La concentration en matières solides et la rapidité avec laquelle le matériau est enrichi dépendent des facteurs suivants :

- nature minéralogique des sols;
- présence d'une nappe phréatique;
- nature de l'outil de perforation utilisé;
- vitesse d'exécution.

#### 1.2.2.2. Caractéristiques mécaniques (cohésion, angle de frottement interne)

Leur connaissance permettra :

- d'étudier la stabilité des tranchées (densité, viscosité du coulis autodurcissable puisque celui-ci remplit le rôle de boue de forage);
- de déterminer le type d'engin de perforation le plus adapté, ce qui peut influencer sur le choix des caractéristiques du matériau à mettre en œuvre.

#### 1.2.2.3. Profondeur du substratum étanche

Celle-ci conditionne :

- le type de matériel à utiliser;
- l'épaisseur de paroi nécessaire pour minimiser les risques de déviation lors de la perforation et pour résister aux contraintes du sol et aux gradients de percolation.

- II. or before construction of an earth dam with an impervious core, at its base level;
- III. The diaphragm wall may be installed at the upstream toe of an upstream membrane dam (see Fig. 22).

It can be shown that there is little risk of hydraulic fracturing for cases I and II, and this is confirmed by experience. On the other hand, for cut off III, the stresses induced by the dam construction are less than the water pressures. Various possibilities have to be considered :

- use of a material with a tensile strength of the order of 200 to 300 kPa;
- reinforcement to the upper part of the diaphragm wall by efficient tension resistant devices (see 3.2.3);
- grouting of the joint to prevent opening.

### 1.2.2. Ground conditions

Cut off walls may be designed in practically all types of soils, and consequently, the filling material must be adapted to very different situations.

#### 1.2.2.1. Geological and physical characteristics of soils

In the case of very permeable ground ( $> 10^{-3}$  m/s) grout leaks from the trench effectively grout the soil. This phenomenon may be controlled by the use of grouts specially designed to suit the soil condition.

In the case of self-hardening grouts, numerous soils (clays, marl, chalk) increase the percentage of dry matter in the material. This induces thickening and, in general an increase in the final strength. The concentration of solids and the speed with which the material is impregnated depend on the following factors :

- mineralogical nature of the soil;
- presence of ground water;
- type of excavation tool used;
- speed of execution.

#### 1.2.2.2. Engineering characteristics of the soils (cohesion, angle of internal friction)

Knowledge of these allows :

- study of trench stability, leading to a determination of the density and viscosity of the self-hardening grout, and hence its ability to fulfill the role of excavation slurry;
- determination of the best type of machine for the excavation; this may influence the choice of material for the job.

#### 1.2.2.3. Depth of the impermeable substratum

This affects :

- the type of equipment to be used;
- the thickness of diaphragm wall necessary to minimise the risk of vertical misalignment during excavation, and to resist the soil stresses and the seepage gradient at the bottom of the excavation.

#### 1.2.2.4. Caractéristiques hydrologiques

Étude piézométrique : niveau de la nappe, régime. En effet, les matériaux plastiques ne doivent pas être utilisés sans précaution dans des sols totalement secs (voir 2.3.4.3. d).

Analyse de l'eau :

- eaux agressives (eaux pures, acides, séléniteuses). Il faut choisir des matériaux pouvant résister à toute altération chimique. Ceci conduira surtout à choisir la nature du ciment la mieux adaptée;
- l'eau peut être chargée en sels flocculants (chlorure, sulfate) pouvant provoquer, selon la nature de l'ion et sa concentration, une fluidification ou un épaissement. Il sera nécessaire d'en tenir compte lors de la définition de la composition, en modifiant le dosage d'argile ou en rajoutant un colloïde protecteur;
- eau saumâtre ou salée : il faudra alors prévoir des dispositions particulières dans l'emploi de la bentonite (voir paragraphe 2.1.).

### 1.2.3. Conditions pratiques locales

#### 1.2.3.1. Disponibilité locale des matériaux

Dans la mesure du possible, il est préférable d'utiliser les matériaux trouvés sur place (ciments, argile, agrégats) en ayant préalablement déterminé en laboratoire leur condition d'emploi.

#### 1.2.3.2. Conditions de mise en œuvre

Suivant la méthode de mise en œuvre et les engins de perforation utilisés, les matériaux devront avoir une viscosité ainsi qu'un temps de prise donnés : pour les coulis autodurcissables, la prise doit être retardée jusqu'à la fin de la perforation, tandis que pour les bétons plastiques, les panneaux primaires doivent déjà avoir une certaine résistance lors de l'exécution des secondaires. Ces valeurs sont donc connues par l'expérience, mais elles sont vérifiées et adaptées pour chaque chantier, en particulier, suivant les conditions climatiques.

### 1.2.4. Conclusions

Pour satisfaire aux contraintes énumérées ci-dessus, les matériaux de remplissage des écrans d'étanchéité épais doivent présenter les principales caractéristiques suivantes :

- *Perméabilité* : définie le plus souvent par le coefficient  $k$  au sens de Darcy :  $k$  de l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  m/s.
- *Déformabilité* : ces matériaux devant supporter les déformations que leur impose le sol sans se fissurer :
  - taux de déformation à la rupture élevé (plusieurs %);
  - module du matériau pouvant être plusieurs fois supérieur à celui du terrain encaissant dans les cas courants.
- *Résistance* à la compression simple ou sous étreinte. Elle doit être faible pour ne pas compromettre les qualités de déformabilité : quelques bars à 28 jours.
- *Pérennité* : stabilité physique et chimique.
- *Érodabilité* : résistance à l'érosion.
- *Maniabilité* : à l'état frais, viscosité, densité en fonction des conditions d'exécution.

#### 1.2.2.4. Hydraulic characteristics

Piezometric study : ground water level, discharge, permeability. In effect, plastic materials may not be adequate in totally dry and pervious soils (see 2.3.4.3.d).

Water analysis :

- aggressive waters (pure water, acids, sulphates). Materials able to resist chemical attack must be chosen. This above all, will dictate the best adapted cement;
- the water may contain flocculant salts (chlorides and sulphates) which may cause, according to the ion and its concentration, liquefaction or thickening. It will be necessary to take this into account when defining the composition : modifying the amount of clay, or adding a colloidal protector;
- saline or brackish water : the particular conditions of use of the bentonite must be investigated beforehand (see paragraph 2.1.).

#### 1.2.3. Local conditions

##### 1.2.3.1. Local availability of materials

In as far as it is possible, it is preferable to use locally available materials (cements, clay, aggregates) which have been previously tested and evaluated.

##### 1.2.3.2. Conditions of use

The method of usage and excavation machine used, affect the viscosity and thus the given setting time to obtain from the materials. For self-hardening grouts the set must be retarded until the end of excavation, whilst for plastic concretes, the primary panels must already have a certain strength when the secondaries are constructed. These values are known from experience, but they are checked and adapted for each site, in particular according to climatic conditions.

#### 1.2.4. Conclusions

Fill materials for thick watertight screens must satisfy the following important conditions :

- *Permeability* : most often defined by the coefficient  $k$  as in Darcy's formula;  $k$  of the order of  $10^{-7}$  to  $10^{-8}$  m/s.
  - *Deformability* : these materials have to be able to follow the deformations imposed on them by the soil without cracking :
    - high deformation at rupture (several percent);
    - modulus of the material to be several times higher than that of the surrounding ground for present cases.
  - *Strength* (compressive strength). Must be low so as not to reduce the deformability : a few bars at 28 days.
  - *Durability* : physical and chemical stability.
  - *Erodibility* : resistance to erosion;
  - *Workability* : in the fresh state, viscosity, density, as a function of the conditions of execution.
-

---

## 2. DESCRIPTION DES MATÉRIAUX USUELS

---

### 2.1. PRODUITS DE BASE

#### 2.1.1. Les argiles

Les argiles peuvent être classées en trois catégories : groupe kaolin, groupe des micas hydratés et groupe bentonite. En fait, les argiles de ce dernier groupe sont les plus employées. Elles nécessitent, en effet, beaucoup moins de produit (30 à 80 kg/m<sup>3</sup> contre 150 à 600 kg/m<sup>3</sup> pour les argiles ordinaires), pour obtenir une boue de qualité égale; le stockage et la préparation sont donc simplifiés. Enfin, pour des raisons d'efficacité technique, l'argile est très rarement utilisée dans la fabrication des coulis autodurcissables.

##### 2.1.1.1. Composition, structure

La montmorillonite qui est la bentonite la plus utilisée, est représentée par :  $0,33 \text{ Na} (\text{Al}_{1,67} \text{ Mg}_{0,33} \text{ O}_3) 4 \text{ SiO}_2, \text{ H}_2\text{O}$ .

L'analyse structurale révèle une structure en feuillets, dont l'élément de base est composé de deux couches de tétraèdres  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  appliquées de part et d'autre d'une couche d'octaèdres, dont les centres sont occupés par un cation métallique  $\text{Al}^{3+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+} \dots$

L'assemblage de ces feuillets donne naissance à des microagrégats (une dizaine de feuillets) ou à des agrégats (quelques centaines de feuillets), qui constituent les particules les plus fines de la bentonite dispersées dans l'eau (0,1 à 2  $\mu$ ).

##### 2.1.1.2. Réactivité

Du fait des réactions d'altération des roches, une partie des atomes de silicium a été substituée par des cations de valence moindre. Ces substitutions qui provoquent des excès de charges négatives sont à l'origine de la capacité d'échange des montmorillonites.

Les cations échangeables qui sont fixés sur les charges négatives disponibles sont localisés dans les espaces interfoliaires et sur les cassures des feuillets. En milieu aqueux, les molécules d'eau se fixent entre les feuillets qui s'écartent et provoquent ainsi le gonflement de la bentonite.

Certaines propriétés importantes des bentonites dépendent étroitement de la nature et du nombre de ces cations échangés. Ce sont : le gonflement, la viscosité des suspensions, la liquidité et la plasticité.

---

## 2. DESCRIPTION OF USUAL MATERIALS

---

### 2.1. BASIC PRODUCTS

#### 2.1.1. Clays

Clays may be classified in 3 categories : the kaolin group, the mica hydrate group, and the bentonite group. In fact, clays of this last group are the most often used. They require much less material (30 to 80 kg/m<sup>3</sup> as opposed to 150 to 600 kg/m<sup>3</sup> for ordinary clays) for a slurry of equal quality. Storage and preparation are thus simplified. In fact, for reasons of technical efficiency, ordinary clay is very rarely used in self-hardening grouts.

##### 2.1.1.1. Composition and structure

Montmorillonite, the bentonite most often used, is represented by :  $0.33 \text{ Na} (\text{Al}_{1.67} \text{Mg}_{0.33} \text{O}_3)_4 \text{SiO}_2, \text{H}_2\text{O}$

Structural analysis reveals a platelet structure, of which the basic element is composed of two layers of tetrahedrons ( $\text{SiO}_4^{4-}$  either side of a layer of octahedrons, the centres of which are occupied by a metal cation  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ...

Groups of these platelets give rise to micro aggregates (ten or so platelets) or aggregates (several hundred platelets) which constitute the finest particles of the bentonite dispersed in the water (0.1 to 2 microns).

##### 2.1.2.2. Reactivity

Owing to the weathering reactions of rock, some of the silicon atoms are substituted by atoms of a lower valency. The substitutions, which cause an excess negative charge, are at the origin of the capacity for change of the montmorillonites.

The exchangeable cations, whose available negative charge is fixed, are localised in the interfolial spaces and on the cracks in the platelets. In an aqueous medium, the water molecules fix themselves between the platelets, which repel each other and thus cause the swelling of the bentonite.

Certain important properties of bentonites depend directly on the nature and number of exchanged cations. These are : swelling, viscosity of suspensions, liquidity and plasticity.

### 2.1.1.3. Propriétés des suspensions de bentonite

#### a) Propriétés rhéologiques : la viscosité

Les suspensions de bentonite appartiennent à la catégorie des fluides de Bingham caractérisés par les paramètres rhéologiques suivants : viscosité et rigidité. Pratiquement ces deux paramètres sont liés et on parle de viscosité globale ou apparente. C'est par exemple, celle qui est mesurée au cône Marsh.

La viscosité ne doit être ni trop forte, afin de permettre une mise en œuvre facile, ni trop faible, pour éviter la sédimentation. Elle est susceptible d'évolution au cours du temps et suivant la nature des terrains traversés (dilution par l'eau du terrain, apport de colloïde...).

#### b) Thixotropie

C'est la propriété qu'a un liquide de se rigidifier quand il ne s'écoule plus. Ceci est lié aux différences formes d'enchevêtrement des micelles et leur agglomération en amas plus ou moins volumineux. Pendant un repos, un arrangement géométrique augmente les valeurs de rigidité et viscosité. Une agitation suffisante permet à la suspension de retrouver ses caractéristiques initiales.

#### c) Propriétés colmatantes

Ces propriétés interviennent lorsque les suspensions sont mises en contact avec le sol :

- dans un premier temps, la suspension envahit une zone proche de la tranchée. L'importance de la pénétration est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol, des caractéristiques rhéologiques et physiques de la suspension, de la pression différentielle existante entre la pression hydrostatique de la boue et la pression interstitielle dans le sol;
- dans un second temps, lorsque les pores ont été obstrués, la suspension se comporte comme un liquide chargé qui se filtre à travers le terrain : c'est l'essorage.

#### d) Contamination : floculation, peptisation

La floculation est la précipitation de particules colloïdales sous la forme de flocons provoquant une évolution des caractéristiques rhéologiques et de la stabilité à la sédimentation.

Le processus inverse est la peptisation. Les deux facteurs de contamination les plus fréquents sont :

- la salinité de l'eau de préparation de la boue (voir 2.1.1.4 b bentonite pour eau saumâtre);
- la teneur en ions  $Ca^{2+}$  + du ciment ajouté (ce facteur est étudié au paragraphe 2.3.3.1 coulis bentonite-ciment).

### 2.1.1.4. Classification des bentonites

Les différentes bentonites peuvent être répertoriées en fonction de leur utilisation.

### 2.1.1.3. *Properties of bentonite suspensions*

#### a) *Rheological properties : viscosity*

Bentonite suspensions fall in the category of Bingham fluids, characterised by the rheological parameters, viscosity and rigidity. In practice, these two parameters are closely related and one talks of overall or apparent viscosity. Viscosity is measured with a Marsh cone.

The viscosity must not be too high, so as to allow easy placing, nor too low, to prevent sedimentation. It is liable to alter with time and according to the nature of the ground (dilution by ground water, bringing in of colloid, etc.).

#### b) *Thixotropy*

This is the property whereby a liquid becomes rigid when it is not flowing. This is closely related to the different forms of disordered stacking of the particles and their packing in a more or less voluminous mass. At rest a geometric arrangement increases the values of rigidity and viscosity. A sufficient agitation allows the suspension to revert to its initial characteristics.

#### c) *Clogging properties*

These properties come into play when the suspensions are placed in contact with the soil :

- first of all, the suspension moves into a zone of soil close to the trench walls. The degree of penetration is a function of the porosity and permeability of the soil, the rheological and physical characteristics of the suspension and the differential existing between the hydrostatic pressure of the slurry and the pore pressure in the soil;
- secondly, when the pores have been blocked, the suspension behaves as a liquid which filters through the soil; allowing water loss, i.e. drying.

#### d) *Contamination : flocculation, peptisation*

Flocculation is the precipitation of colloidal particles in the form of flakes, causing a change in the rheological characteristics and the stability as regards sedimentation. The reverse process is peptisation. The two most frequent contamination factors are :

- salinity of the water used for slurry preparation (see 2.1.1.4. bentonite for brackish water);
- the amount of  $\text{Ca}^{2+}$  ions of the added cement (this factor is studied in § 2.3.3.1. Bentonite cement grouts).

### 2.1.1.4. *Classification of bentonites*

The various bentonites may be divided up according to their usage.

a) *Bentonites pour boues de forage normales*

On les caractérise par leur rendement. Celui-ci, exprimé en grammes de bentonite par litre d'eau, correspond à la masse maximale de bentonite qu'il faut ajouter à un litre d'eau pour obtenir une boue de viscosité 40 s Marsh.

b) *Bentonites pour boues-ciment*

Les caractéristiques techniques de ces bentonites sont de donner un bon épaissement vis-à-vis du ciment et, d'autre part, d'être stables de façon à obtenir des coulis à taux de décantation limité pour une viscosité référence de 40 s Marsh.

Le rendement pour les boues ciment correspond à la masse maximale de bentonite nécessaire à l'obtention d'une viscosité 40 s Marsh, lorsque 200 g de ciment sont additionnés à un mélange constitué de cette masse de bentonite.

Généralement, on obtient de meilleurs résultats lorsque le ciment n'est ajouté qu'après hydratation complète de la bentonite.

c) *Bentonites pour eaux saumâtres*

Les bentonites classiques flocculent en présence d'eau de mer ou d'eau saumâtre :

- lorsque l'eau de préparation a une teneur en sels inférieure à 5 g/l, une légère surconsommation de bentonite résout le problème;
- pour des teneurs en sels supérieures :
  - la boue est préparée à l'eau douce, elle possède alors un rendement normal; par contact avec l'eau de mer, elle est très perturbée;
  - la boue est préparée à l'eau de mer avec un dosage normal, en lui adjoignant un colloïde protecteur;
  - on utilise une bentonite spéciale pour eau de mer; leur rendement est souvent irrégulier.

## 2.1.2. Ciments

Un liant hydraulique est une poudre minérale qui forme avec l'eau une pâte faisant prise, durcissant progressivement, même à l'abri de l'air, et notamment sous l'eau.

Les ciments sont des liants hydrauliques dont les constituants essentiels sont des silicates et des aluminates de calcium anhydres, susceptibles de se dissoudre dans l'eau et de donner des silicates, des aluminates et de la chaux libre. Cette hydratation est suivie d'une cristallisation de ces hydrates laquelle est à l'origine de la prise et du durcissement du ciment.

### 2.1.2.1. Constituants du ciment

Le ciment résulte du broyage isolé ou simultané de divers composants :

- *Clinker* : produit obtenu par cuisson à haute température d'un mélange soigneusement dosé d'argile et de calcaire. Ce clinker, mélangé à du gypse dans une proportion de l'ordre de 2 à 6 %, puis broyé, donnera le ciment portland pur.
- *Laitier granulé* : sous-produit de la fabrication de la fonte. Il est composé principalement de chaux vive (40 %), de silice (31 %) et d'alumine (16 %).

a) *Bentonites for normal drilling slurries*

They are characterised by the maximum mass of bentonite that has to be added to a litre of water to give a slurry of viscosity 40 s Marsh. This dosage is expressed in grammes per litre of water.

b) *Bentonites for cement slurries*

The technical characteristics of these bentonites are such that they give a good thickening with respect to the cement, and also to be stable so as to obtain grouts with a limited segregation rate for a reference viscosity of 40 s Marsh.

The dosage for the cement slurries corresponds to the maximum mass of bentonite necessary to obtain a viscosity of 40 s Marsh when 200 g of cement are added to a mixture made up of this mass of bentonite and one litre of water.

Generally, better results are obtained when cement is added only after the hydration of bentonite is completed.

c) *Bentonites for brackish water*

Normal bentonites flocculate in the presence of sea water or brackish water :

- When the water to be used has a salt content less than 5 g/l, a slight excess of bentonite solves the problem;
- for greater salt contents :
  - the slurry is prepared with fresh water, thus having a normal dosage. On contact with sea water, it becomes very disturbed;
  - the slurry is prepared with sea water, and the normal dosage, but with the addition of a colloid protector;
  - a special sea water bentonite is used; the dosage is often erratic.

## 2.1.2. Cements

A hydraulic binder is a mineral powder, which, with water, forms a progressively hardening paste that will set even when shielded from air, and notably under water.

Cements are hydraulic binders, the main constituents of which are anhydrous calcium silicates and aluminates; with water they give hydrated silicates and aluminates and free lime. This hydration is followed by a crystallisation of these hydrates, which is the origin of the set and hardening of cement.

### 2.1.2.1. Constituents of cements

Cement results from the isolated or simultaneous grinding of various components :

- *Clinker* : A product obtained by high temperature firing of a carefully batched mixture of clay and limestone. This clinker, when mixed with about 2 to 6 % gypsum, gives pure Portland cement.

- *Granulated slag* : by-product of iron smelting. It is composed principally of quicklime (40 %), silica (31 %) and alumina (16 %).

- *Cendres volantes* : sous-produit de la combustion du charbon et de la lignite réalisée dans les centrales thermiques. Leur caractéristique essentielle est de présenter une activité pouzzolanique, c'est-à-dire, qu'elles sont capables, en présence d'eau à la température ordinaire, de fixer de l'hydroxyde de calcium pour donner naissance à des composés stables présentant des propriétés hydrauliques. L'adjonction de cendres à un ciment portland augmente la résistance finale et améliore son comportement vis-à-vis des eaux pures et sulfatées, au feu et au choc thermique.

- *Les pouzzolanes* : naturelles ou artificielles présentent des caractéristiques analogues aux cendres.

- *Filler* : produit obtenu par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, kieselguhr).

#### 2.1.2.2. Classification des ciments

Le Tableau I donne une classification simplifiée des ciments selon le CEMBU-REAU.

Le Tableau II est extrait des spécifications de l'ASTM pour les Portlands (C 150) et les autres ciments (C 595).

Dans ce texte, les références de ciments sont celles du Tableau I.

Leur composition figure sur le diagramme de Rankin (Fig. 4).

#### 2.1.2.3. Les eaux agressives

Les deux types d'eaux agressives les plus courants sont les eaux pures et les eaux séléniteuses :

- *Les eaux pures* : elles dissolvent la chaux libre du ciment.

- *Les eaux séléniteuses* : le résultat de l'attaque est un produit (sel de Candlot) qui en gonflant fortement dans les pores du béton ou du mortier, en provoque plus ou moins rapidement la destruction.

Dans les deux cas, il est possible de ralentir l'action agressive en utilisant des ciments libérant le moins de chaux possible (BLF) ou (POZ).

#### 2.1.2.4. Dosages usuels pour les écrans

Dans le cas des conglomérats plastiques (coulis autoturcissables et bétons plastiques), le dosage en ciment est très faible, les C/E étant de l'ordre de 0,1 à 0,3. A ces valeurs de C/E, les caractéristiques mécaniques des (BLF) sont bien supérieures à celles des (P) : on trouve une relation croissante entre la résistance et la teneur en laitier (Fig. 5).

### 2.1.3. Les adjuvants

Ils sont destinés à assurer, en toutes circonstances, une bonne maniabilité. Ils agissent sur les paramètres suivants : temps de prise et fluidité.

- *Fly-Ash* : by-product of the combustion of coal and lignite product in thermal power stations. Fly-ash consists primarily of non-cohesive silt-sized particles entrained in the gases leaving the furnace. Their essential characteristic is the presence of pozzolanic activity, that is that in the presence of water at normal temperatures they are able to fix calcium hydroxide, giving rise to stable compounds with hydraulic properties. The addition of ash to a Portland cement increases the final strength and may improve its behaviour with regard to pure and sulphated water, fire and thermal shock.

- *Pozzolanic materials* : whether natural or artificial, these have characteristics similar to those of ash.

- *Filler* : produced by fine grinding or pulverisation of certain rocks (limestone, basalt, slags, kieselguhr (bentonite, fly ash (P.F.A.)).

#### 2.1.2.2. Classification of cements

Table 1 shows a simplified classification of cements according to the European Cement association, CEMBUREAU.

Table 2 is extracted from the ASTM specifications for portland (C 150) and blended cements (C 595).

In this text, the references of cement are those of Table I (see Tables 1 and 2 in appendix).

Composition is shown by the Rankin diagram (Fig. 4).

#### 2.1.2.3. Aggressive water

The two types of aggressive water most often encountered are pure water and selenitic water :

- *Pure water* : dissolves the free lime in the cement.

- *Selenitic water* : attack results in a salt, the tricalcium sulphoaluminate which destroys the concrete or mortar by expanding vigorously in the pores of the material.

In these two cases, it is possible to slow down the aggressive action by the use of cements with as little free lime as possible (BLF or POZ).

#### 2.1.2.4. Usual batching for curtain walls

In the case of plastic conglomerates (self-hardening grout and plastic concretes), the cement content is very low, the cement water ratio being of the order of 0.1 to 0.3. At these values of C/W the mechanical characteristics of (BLF) are much better than those of (P); the relationship between strength and proportion of binder is shown in Figure 5.

### 2.1.3. Admixtures

These are to ensure a good workability in all circumstances. They affect the set time and the fluidity.

### 2.1.3.1. Les retardateurs de prise

On utilise généralement des retardateurs organiques (lignosulfite, hydrates de carbone...).

### 2.1.3.2. Les accélérateurs de prise

Contrairement au retard, le phénomène d'accélération de prise dépend de la concentration et de la composition du ciment employé. L'utilisation des accélérateurs est délicate. Les plus employés sont le chlorure de calcium, la lessive de soude, le carbonate et le bicarbonate de sodium.

### 2.1.3.3. Les fluidifiants

Des études ont montré que certains retardateurs sont fluidifiants s'ils sont introduits *après* le ciment :

- introduits à la préparation avant le ciment, ils joueront le rôle de retardateur, sans pour autant abaisser la viscosité;
- additionnés à un matériau trop épais, ils diminueront la viscosité.

## 2.2. LE BÉTON CLASSIQUE

Le béton classique permet de réaliser un écran en exécutant une succession de panneaux moulés dans le sol.

### 2.2.1. Barrages neufs

D'importantes contraintes vont se manifester lors de la construction de la digue et de la mise en eau de la retenue (paragraphe 1.2.1.2.), provoquant des déformations importantes de l'écran. Ainsi, à moins d'être situés sur l'axe du barrage, les panneaux supportent un moment fléchissant d'axe horizontal susceptible de les casser s'ils ne sont pas très fortement armés. En outre, l'absence de serrure entre les panneaux permet aux joints de s'ouvrir.

Un écran en béton classique n'est donc concevable que dans l'axe du barrage et à condition qu'il ne soit pas trop profond afin de ne pas être écrasé par le frottement négatif provoqué par le tassement du massif. En outre, il faut aménager sa jonction avec le barrage pour supprimer l'effet couteau.

### 2.2.2. Réfection d'ouvrages

Dans ce cas, par contre, les déformations les plus importantes sont terminées et les efforts imposés à l'écran sont beaucoup plus faibles. Il est alors parfaitement possible de concevoir un écran en béton rigide.

### 2.2.3. Composition

Un béton d'étanchéité rigide nécessite un fort dosage en ciment, afin de présenter une grande maniabilité, condition d'une homogénéité correcte. En outre, un tel béton doit avoir, non seulement ses vides intergranulaires comblés en mortier

#### 2.1.3.1. *Set retarders*

Organic retarders are generally used (lignosulfite, hydrocarbons, etc.).

#### 2.1.3.2. *Set accelerators*

Unlike retarding the set, the phenomenon of set acceleration depends on the concentration and composition of the cement used. The use of accelerators is a delicate operation. The most often used are calcium chloride, washing soda and sodium carbonate or bicarbonate.

#### 2.1.3.3. *Plasticisers*

Studies have shown that certain retarders are plasticisers if they are added *after* the cement :

- if added to the mixture before the cement, they act as retarders without lowering the viscosity;
- added to a material that is too thick, they reduce the viscosity.

## 2.2. CONVENTIONAL CONCRETE

Conventional concrete enables a cut off wall to be made by producing a series of cast-in-place panels in the soil.

### 2.2.1. **New dams**

Considerable stresses are going to be induced whilst the dam is being built and the reservoir filled (§ 1.2.1.2.), causing significant deformations in the cut off wall. Therefore, unless they are in the axis of the dam, the panels support a bending moment with horizontal axis liable to break them if they are not heavily reinforced. Also, the absence of an interlock between the panels allows the joints to open.

A cut off wall in conventional concrete is therefore usually best on the axis of the dam, and then only as long as it is not so deep as to be crushed by the negative skin friction due to the settlement of the soil mass. Also, its joint with the dam must be arranged so as to dissipate the cutting effect.

### 2.2.2. **Restoration of structures**

In this case, on the other hand, the major deformations have already occurred and the loads on the cut off wall are much lower. It is, then, quite possible to conceive a cut off wall in rigid concrete.

### 2.2.3. **Composition**

A highly impermeable concrete requires a large proportion of cement in order to give good workability, requisite for homogeneity. Also such a concrete must not only have its intergranular voids filled with rich mortar, but must also have all its

riche, mais tous ses grains inertes, même les plus fins, doivent être enrobés d'un film de ciment d'agglutination. La surface spécifique de l'ossature doit donc être d'autant plus élevée qu'elle est plus riche en éléments fins et très fins.

La courbe granulométrique doit être continue et limitée à 25 mm. Sa définition optimale en fonction des différents matériaux disponibles se détermine par les méthodes habituelles : représentation triangulaire de Feret, méthode volumétrique.

On peut ajouter un retardateur de rigidité pour faciliter la mise en œuvre.

Par exemple, la composition du béton utilisé sur le site de Manicouagan (Canada) est la suivante :

— Ciment (type P) .....	200 kg
— Eau .....	100 kg
— Sable .....	433 kg
— Pierre 3/4" (20 mm) .....	452 kg

soit C/E = 2.

### 2.3. CONGLOMÉRATS PLASTIQUES

Sont désignés par ces termes, les matériaux constitués de ciment et d'argile, avec ou sans agrégats, à C/E très faible. Ils présentent un certain nombre de caractéristiques communes et sont utilisés concurremment. Leur étude est faite en parallèle.

#### 2.3.1. Principe

Dans un béton normal ( $C/E > 2$ ), les grains de ciment cristallisés sont si proches les uns des autres que l'enchevêtrement des cristaux conduit à un système résistant et peu déformable. Pour donner à ce système une certaine mobilité, on peut écarter artificiellement ces cristaux. Le plus simple pour y parvenir, consiste à mettre un excès d'eau. Un tel béton n'est pas stable à l'état frais (ségrégation, sédimentation du ciment). Par conséquent, il faut ajouter au système un agent stabilisant qui n'ait pas d'influence sur la résistance. Cet agent est fréquemment la bentonite.

Ceci conduit donc à l'utilisation de béton ou mortier « plastique » mis en œuvre selon la technique classique des parois moulées.

Mais en fait, les agrégats contribuent faiblement aux propriétés du matériau. D'où l'idée de les supprimer. Ceci conduit à la mise au point des coulis auto-durcissables remplissant le double rôle de boue de forage et de matériau de remplissage définitif.

#### 2.3.2. Mortiers et bétons plastiques

##### 2.3.2.1. Composition des bétons plastiques

Les bétons plastiques sont constitués de :

*Boue bentonitique* : à haute viscosité (50 s Marsh). Son rôle est de maintenir en suspension les grains de ciment et les agrégats pendant la mise en œuvre et, dans une large mesure, d'assurer la plasticité et l'étanchéité. Le pourcentage de bentonite (rapporté au poids d'eau) varie de 2 à 12 % selon son taux d'hydratation.

inert particles, even the finest, coated with a film of binding cement. The accordingly raised specific surface required may be gained by using more and finer fines.

The grading curve must be continuous and limited to a maximum size of 25 mm. As a function of the available materials, this is optimised by the usual methods : Feret triangular representation, volumetric method, etc.

A rigidity retarder may be added to facilitate placing.

For example, the composition of the concrete used on the Manicouagan site (Canada) is as follows :

— P type cement .....	200 kg
— Water .....	100 l
— Sand .....	433 kg
— 3/4" stone (20 mm) .....	452 kg

then C/W = 2

### 2.3. PLASTIC CONGLOMERATES

Under this heading are materials made from cement and clay, with or without aggregates, at very low C/W ratios. They offer a certain number of common characteristics and are used concurrently. They are considered below.

#### 2.3.1. Principle

In normal concrete ( $C/W > 2$ ) the crystallised cement grains are so close together that the crystal matrix forms a strong system that deforms very little. To give this system a certain mobility, the crystals must be artificially spaced apart. The simplest way of doing this is to add excess water. Such a concrete is unstable in the fresh state (segregation, separation of the cement). Consequently, a stabilising agent must be added to the system, which will not affect the strength. This agent is often bentonite.

This leads to the use of « plastic » concrete or mortar, placed according to conventional techniques for cast-in-place diaphragm walls.

But, in fact, aggregates contribute little to the material properties. Why not, then, leave them out? Hence the self-hardening grouts fulfill the double role of an excavation slurry and a final filling material.

#### 2.3.2. Plastic concretes and mortars

##### 2.3.2.1. Composition of plastic concretes

Plastic concretes are made up of :

*Bentonitic slurry* : of high viscosity (50 s Marsh). Its role is to keep the cement grains and aggregates in suspension during placing, and, to a large degree, to assure plasticity and impermeability. The percentage of bentonite (with respect to the weight of water) varies from 2 to 12 % according to its hydration rate.

**Ciment** : en faible proportion :  $0,1 < C/E < 0,3$  suivant la nature du ciment. Il assure la cohésion et apporte la résistance mécanique.

**Agrégats** : environ 50 % du volume total. Cette quantité permet de ne jamais avoir de grains jointifs, ce qui diminuerait les possibilités de déformation. La courbe granulométrique doit être continue; elle est généralement limitée à 30 mm et ne contient pas une fraction trop importante d'éléments fins; si ces derniers sont colloïdaux, on a la possibilité de réduire le dosage en bentonite.

On peut définir une composition moyenne par mètre cube :

- Boue bentonitique ..... 400 à 500 l
- Ciment ..... 100 à 200 kg
- Agrégats ..... < 1 500 kg lorsqu'on dispose d'une granulométrie favorable  
< 1 300 kg avec granulométrie défavorable

Ceci correspond à une densité de 1,8 à 2,1.

#### 2.3.2.2. Composition des mortiers

Les agrégats sont remplacés par du sable moyen, voire fin. Une composition moyenne par mètre cube est située dans la fourchette de valeurs :

- Boue bentonitique ..... 375 à 750 l
- Ciment ..... 75 à 290 kg
- Sable moyen à fin ..... 500 à 1 000 kg

#### 2.3.2.3. Caractéristiques rhéologiques

La viscosité et la rigidité sont déterminées uniquement sur le liant pur (eau + argile + ciment), les agrégats constituant la partie inerte du mélange.

**Caractéristiques initiales** : la viscosité de la boue est de l'ordre de 50 s. L'addition de ciment modifie peu cette valeur : on considère qu'à une viscosité de 50/55 s, correspond un coulis stable. La rigidité est alors de l'ordre de 0,3 à 0,4 g/cm<sup>2</sup> (30 à 40 Pa).

**Évolution dans le temps** : la viscosité et la rigidité évoluent lentement. Par expérience, on considère que la phase liante reste pratiquement maniable tant que sa rigidité ne dépasse pas 0,5 g/cm<sup>2</sup> (à titre indicatif).

### 2.3.3. Coulis autodurcissables

#### 2.3.3.1. Composition

Le coulis autodurcissable est un mélange d'eau, de ciment et de bentonite auxquels sont adjoints des produits régulateurs de prise et de durcissement. Il assure un double rôle :

- il se comporte pendant la perforation comme une boue de forage traditionnelle, ce qui impose certaines propriétés rhéologiques;
- un certain nombre de mois après la perforation, il s'assimile à un organe de fondation et doit par conséquent posséder certaines caractéristiques mécaniques.

Composition moyenne par mètre cube de coulis :

- 80 à 350 kg de ciment;

**Cement** : in small proportions,  $0.1 < C/W < 0.3$  according to the type of cement. It gives cohesion and mechanical strength.

**Aggregates** : around 50 % of the total volume. This quantity prevents grains from ever joining and thus reducing the deformability. The grading curve must be continuous; it is generally limited to 30 mm maximum size and does not contain too large a fraction of fines. If the latter are colloidal, it may be possible to reduce the amount of bentonite.

The average composition of a  $m^3$  may be :

- Bentonitic slurry ..... 400 to 500 l
- Cement ..... 100 to 200 kg
- Aggregates < 1 500 kg with favourable grading  
< 1 300 kg with unfavourable grading.

This corresponds to a density of 1.8 to 2.1.

#### 2.3.2.2. *Composition of mortars*

The aggregates are replaced by medium to fine sands. An average composition for a  $m^3$  comes in the range :

- Bentonitic slurry ..... 375 to 750 l
- Cement ..... 75 to 290 kg
- Medium to fine sand ..... 500 to 1 000 kg

#### 2.3.2.3. *Rheological characteristics*

The viscosity and rigidity are determined solely by the pure binder (water + clay + cement), the aggregates constituting the inert part of the mixture.

**Initial characteristics** : the Marsh funnel viscosity of the slurry is of the order of 50 s. The addition of cement does not modify the value by much. A stable grout has a viscosity of 50/55 s. The corresponding rigidity is of the order of 30 to 40 Pa.

**Evolution with time** : viscosity and rigidity evolve slowly. From experience, the binder phase is considered to remain practically workable for as long as the rigidity remains below 50 Pa.

### 2.3.3. **Self-hardening grouts**

#### 2.3.3.1. *Composition*

Self-hardening grout is a mixture of water, cement and bentonite to which is added set and hardening regulators. It fulfills a double role :

- during excavation it behaves as a traditional excavation slurry, having certain rheological characteristics;
- a certain number of months after the excavation, it becomes a foundation component and must, therefore possess certain mechanical characteristics.

Average composition per  $m^3$  of grout :

- 80 to 350 kg of cement;

- $0,1 < C/E < 0,25$  avec (BLF);
  - $0,2 < C/E < 0,3$  avec (P) (lorsque son emploi est possible);
  - s'il y a risque d'attaque du coulis et que l'on ne dispose que de (P), on ajoute des cendres volantes en proportion de 10 à 100 % par rapport au poids du ciment;
  - 30 à 50 kg de bentonite;
  - adjuvant :
    - retardateur de prise pour faciliter le travail de perforation à viscosité constante et permettre la reprise des travaux après un arrêt;
    - amélioration des caractéristiques rhéologiques.
- Ceci correspond à une densité comprise entre 1,2 et 1,3 et un pourcentage en matière sèche entre 25 et 35 %.

### 2.3.3.2. Caractéristiques rhéologiques initiales

Le passage d'une boue bentonitique à un coulis bentonite-ciment s'effectue en trois phases :

- augmentation instantanée très importante de la viscosité analogue à une fausse prise;
- destruction de cette fausse prise par l'agitation provoquée par l'appareil de malaxage. La viscosité relevée à la fin de cette phase est appelée viscosité initiale;
- durant les heures qui suivent, le ciment amorce sa prise et le coulis devient plus visqueux.

Généralement la viscosité initiale doit être voisine de 40 s Marsh. En cas de terrains très perméables, une viscosité initiale plus élevée permet de réduire la décantation et l'essorage. La nature et le dosage en ciment étant imposés par la résistance et la déformabilité, la viscosité sera ajustée en agissant sur la bentonite.

### 2.3.3.3. Évolution des caractéristiques rhéologiques

La préparation d'un coulis respectant ces caractéristiques initiales est parfaitement maîtrisée. Cependant, différents phénomènes se manifestent (début de prise de ciment, décantation, essorages) provoquant des variations importantes des propriétés rhéologiques. Le coulis servant de fluide de perforation, il est nécessaire de maintenir la viscosité et la rigidité à des valeurs raisonnables pendant une quinzaine d'heures et ce, naturellement sans diluer la boue afin de ne pas modifier les caractéristiques mécaniques après prise. En pratique, on admet que la viscosité à obtenir en fin de perforation est de 50 s, la viscosité initiale étant de l'ordre de 40 s. Dans les cas extrêmes, on peut atteindre 60 à 70 s.

#### a) Épaississement dû à la prise du ciment (Fig. 6)

La rigidification du coulis évolue peu pendant la perforation. Elle croît rapidement lorsque celle-ci est terminée. La vitesse de rigidification au repos est très variable avec la nature du couple bentonite-ciment.

#### b) Épaississement par apport des fines du terrain

Au cours de la perforation, le coulis s'enrichit en éléments fins du terrain. Ceci provoque à court terme un épaississement, à long terme une amélioration de la résistance.

- $0.1 < C/W < 0.25$  with (BLF) (see 2.1.2.2.);
- $0.2 < C/W < 0.30$  with (P) (when its use is possible);
- If there is a risk of attack on the grout, and only (P) is available, fly ash is added in proportion 10 to 100 % with respect to the weight of cement;
- 30 to 50 kg of bentonite;
- admixture :
  - set retarder to facilitate drilling at constant viscosity and allowing work to be restarted after a stop;
  - improvement of rheological characteristics.

This corresponds to a density between 1.2 and 1.3 and a percentage of dry matter between 25 and 35 %.

#### 2.3.3.2. *Initial rheological characteristics*

The transition from a bentonitic slurry to a bentonite-cement grout is carried out in 3 stages :

- very significant instantaneous increase in viscosity analogous to a false set;
- breakdown of this false set by the excavation tool. The viscosity rises again at the end of this phase and is called the initial viscosity;
- during the hours that follow, the cement starts to set, and the grout becomes more viscous.

Generally the initial viscosity must be around 40 s Marsh. In the case of very permeable ground a higher initial viscosity allows a reduction of grout loss. The nature and quantity of cement being imposed by strength and deformability, the viscosity will be adjusted with bentonite.

#### 2.3.3.3. *Evolution of rheological characteristics*

Various phenomena manifest themselves (start of set, decantation and drying out) causing significant variations in the rheological properties. With the grout serving as drilling fluid, it is necessary to maintain the viscosity and rigidity at reasonable values for fifteen hours or so, obviously without diluting the slurry so as not to change the characteristics after set. In practice, the viscosity reaches 50 s by the end of excavation, the initial viscosity being of the order of 40 s. In extreme cases 60 or 70 s may be reached.

##### a) *Thickening due to cement set* (Fig. 6)

The rigidity of the grout increases little during excavation but when it is finished, rises rapidly. The rate of rigidification at rest varies with the nature of the bentonite-cement combination.

##### b) *Thickening by inclusion of fines from the ground*

During excavation the grout is enriched with fines from the ground. In the short term this causes thickening, and in the long term an increase in strength.

Un exemple d'augmentation de la rigidité en fonction du temps et de l'apport d'éléments fins (craie, C/E = 0,25), est donné en annexe, Tableau 3.

c) *Perte d'eau par ressuage*

Le ressuage est provoqué par la décantation des grains de ciment. Il se manifeste par :

- la ressuée : frange d'eau libre en surface;
  - l'accroissement du C/E de haut en bas conduisant à des écarts de résistance.
- Des essais en laboratoire ont mis en évidence les éléments suivants :
- la décantation est inversement proportionnelle à la rigidité initiale;
  - le taux de ressuée peut varier dans des rapports 1 à 10 selon le couple bentonite-ciment.

L'emploi d'un coulis présentant une viscosité de 50 s en fin de perforation permet d'obtenir des taux de ressuée inférieurs à 4 %.

d) *Perte d'eau par essorage*

L'essorage résulte de la filtration de l'eau au travers du cake sous l'effet de la différence de pression entre le coulis et la nappe.

On remarque que le filtrat est dix à quinze fois plus important pour un coulis que pour une boue normale. En effet, le cake est nettement moins étanche et la densité est plus élevée (Fig. 7).

Il n'est pas possible d'éliminer totalement ce facteur puisqu'il contribue à la stabilisation de la tranchée. Certains adjuvants jouent le rôle de réducteur de filtrat (Fig. 8).

## **2.3.4. Déformabilité des conglomérats plastiques**

### *2.3.4.1. Loi générale de comportement*

Comme tout matériau à base de ciment, soumis à une contrainte axiale croissante, une éprouvette de coulis durci se déforme de quelques % d'une manière purement élastique, puis elle entre en phase plastique avec des déformations de quelques % puis elle se rompt (Fig. 9).

Il est souhaitable que le matériau entre en phase plastique, afin qu'il présente les qualités de déformabilités définies au paragraphe 1.2.1.2. On sait que tous les matériaux peuvent se déformer plastiquement, à condition de leur imposer une étreinte latérale suffisante. Les conglomérats plastiques entrent en phase plastique pour des étreintes faibles de l'ordre de 100 kPa. Une augmentation du rapport de l'étreinte latérale ( $\sigma_3$ ) à la résistance à la compression se traduit par une augmentation des déformations plastiques.

Mais la valeur de 3 est imposée par l'ouvrage : c'est la poussée des terres au repos (de l'ordre de 100 kPa en moyenne). Afin que le matériau ait une déformabilité importante on aura intérêt à adopter une résistance en compression la plus faible possible proche de 3.

An example of the increase in rigidity as a function of time and amount of fines included (chalk,  $C/W = 0.25$ ) is given in Table 3 in appendix.

c) *Loss of water by bleeding*

Bleeding is caused by the decanting of the cement grains. It is apparent by :

- The film of clear water on the surface;
- an increase in  $C/W$  from top to bottom, leading to discrepancies.

Laboratory tests have shown the following :

- decantation is inversely proportional to initial rigidity;
- the rate of bleeding may vary by a ratio of 1 to 10 according to the cement-bentonite combination.

Use of a grout with a viscosity of 50 s at the end of excavation allows bleeding rates of less than 4 % to be obtained.

d) *Loss of water by filtration*

Loss of water results from the filtration of the water through the grout saturated soil, or « cake », under the effect of the pressure differential between the grout and the water table.

The rate of filtration can be seen to be 10 to 15 times greater for a grout than for an ordinary slurry. In effect, the cake is plainly less watertight and the density higher (Fig. 7).

It is not possible to totally eliminate this factor, since it contributes to the stability of the trench. Certain admixtures reduce the filtration rate (Fig. 8).

### **2.3.4. Deformability of plastic conglomerates**

#### *2.3.4.1. General behaviour law*

Like all cement based materials submitted to an increasing axial stress, a test sample of hardened grout will deform a few percent elastically, then enter a plastic phase with further deformations of a few percent, then it will fail (Fig. 9).

It is hoped that the material will enter the plastic phase, so that the deformation qualities defined in 1.2.1.2. become evident. It is known that all the materials will deform plastically, if sufficiently constrained laterally. Plastic conglomerates enter the plastic phase with low constraints; of the order of 100 kPa. An increase in the ratio of lateral constraint ( $\sigma_3$ ) to compressive strength, results in an increase in the plastic deformations (Fig. 10, 11).

But the value of  $\sigma_3$  is imposed by the structure; it is the earth pressure at rest. So that the material has a significant deformability, one aims to adopt a compressive strength as low as possible and close to this earth pressure.

#### 2.3.4.2. Facteurs influençant la déformabilité

La résistance et la déformabilité étant liées, tous les facteurs agissant sur l'une agiront sur l'autre (cf. 2.3.5.1.) :

- rapport C/E (Fig. 10);
- nature du ciment (Fig. 11);
- essorage.

Pour les coulis, la vitesse de mise en charge a une importance non négligeable dans le domaine plastique lors d'essais triaxiaux (Fig. 12). Par contre, elle n'a aucune influence lors d'essais monoaxiaux.

La Figure 13 regroupe les résultats des essais portant sur un certain nombre de coulis, mortiers et bétons plastiques de compositions différentes.

#### 2.3.4.3. Déformation par retrait

##### a) Retrait avant prise

Il commence dès la préparation du mélange et a pour origine une contraction du ciment et un dégazage progressif de l'air entraîné à la préparation. Dans le cas des matériaux plastiques, ceux-ci étant encore à l'état pseudo-liquide à l'époque du retrait, il ne peut y avoir fissuration.

##### b) Retrait hydraulique

Il est dû à une recristallisation des grains de ciment.

##### c) Retrait thermique

Il résulte de l'élévation de température lors de la prise (10 à 15  $\mu/m/^\circ C$  pour les bétons classiques). L'échauffement étant pratiquement nul avec les conglomerats plastiques, il n'y a pas à tenir compte de ce retrait.

##### d) Retrait par perte d'eau

C'est à ce type de retrait que les matériaux plastiques sont le plus sensibles, son action étant plus importante sur les coulis que sur les bétons plastiques. On peut donner les ordres de grandeurs suivants :

- coulis protégé de la déshydratation (sol humide ou sous la nappe) retrait d'environ 50  $\mu/m$ ;
- coulis non protégé : très mauvais comportement, retrait très élevé et fissuration;
- béton plastique sous l'eau : retrait d'environ 1  $\mu/m$ ;
- béton plastique en zone non humide : mauvais comportement;
- un béton normal sous l'eau gonfle d'environ 100  $\mu/m$ .

Les matériaux plastiques sont généralement plongés dans un milieu humide sauf à proximité de la surface. Des dispositions particulières doivent être prises à ce niveau : adjonction de sable pour répartir une fissuration éventuelle, modification du dosage en ciment, protection à l'aide d'une feuille plastique étanche verticale dans la paroi, mise en place d'une certaine épaisseur de terre.

#### 2.3.4.2. Factors influencing deformability

Strength and deformability are closely related; all the factors affecting one will affect the other (cf. : 2.3.5.1.).

- C/W ratio (Fig. 10);
- type of cement (Fig. 11);
- water loss by filtration.

For grouts, the loading rate has a considerable importance in the plastic region of the triaxial test (Fig. 12). On the other hand, it has no effect in the monoaxial test.

Figure 13 shows the grouped results of tests carried out on a certain number of grouts, mortars and plastic concretes of different compositions.

#### 2.3.4.3. Shrinkage deformation

##### a) *Shrinkage before set*

This starts at the time of mixing and originates from a contraction of the cement and expulsion of air entrained during preparation. Plastic materials do not suffer cracking since they are still in a pseudo-liquid state during this shrinkage.

##### b) *Hydraulic shrinkage*

Caused by recrystallisation of the cement grains.

##### c) *Thermic shrinkage*

This results from the temperature rise on setting (10 to 15.μ/m/°C for standard concrete). Since the heating up of plastic conglomerates is practically zero, this shrinkage is not taken into account.

##### d) *Shrinkage from water loss*

It is to this type of shrinkage that plastic materials are most sensitive; its action being more significant on grouts than plastic concretes. The following orders of magnitude may be given :

- grout protected against dehydration (wet soil or beneath the water table) : shrinkage around 50.μ/m;
- unprotected grout : very poor behaviour, very great shrinkage and cracking;
- plastic concrete under water : shrinkage about 1.μ/m;
- plastic concrete in a dry zone : poor behaviour;
- normal concrete under water swells by about 100.μ/m.

Plastic materials are generally immersed in a wet medium except near the surface. Certain procedures must be carried out at this level : addition of sand to distribute possible cracking, modification of the cement proportions, protection by a vertical plastic watertight sheet in the wall, and placing a certain thickness of soil.

### 2.3.5. Résistance des conglomérats plastiques

La nécessité d'une déformabilité élevée impose une résistance en compression la plus proche possible de l'étreinte latérale, laquelle a une valeur moyenne de 100 kPa. En conséquence, les cahiers des charges fixent une résistance maximale de l'ordre de quelque 100 kPa à vingt-huit jours (Fig. 14).

Cette résistance doit avoir une valeur suffisante pour résister aux contraintes du sol et au poids du barrage.

- en moyenne, pour les coulis .....  $R_c = 100$  kPa à 28 jours;  
 $R_c = 150$  kPa à 90 jours;
- pour un béton plastique .....  $R_c < 1\ 000$  kPa à 28 jours.

#### 2.3.5.1. Paramètres influant sur la résistance

##### a) Rapport C/E

La résistance à la compression simple à un temps de vieillissement donné est fonction principalement du rapport C/E.

##### b) Nature du ciment

Chaque ciment suit sa propre relation  $R = f(C/E)$ . Ainsi à C/E constant, l'utilisation de (BLF) à la place du (P) augmente la résistance de 50 à 100 % (Fig. 11).

##### c) Bentonite

Son influence est du second ordre.

##### d) Dosage et granulométrie des agrégats

On a déjà vu quelles étaient les limites de dosage en agrégats (cf. : paragraphe 2.3.2.1.). Dans ces limites, un accroissement de celui-ci augmente très nettement la résistance sous étreinte. Par contre, on ne constate pas de différence importante dans les résistances à l'écrasement (Fig. 15).

#### 2.3.5.2. Effet de l'essorage

L'essorage est à considérer particulièrement dans le cas des coulis. Sa conséquence est l'augmentation du rapport C/E. La résistance finale correspond alors à celle du nouveau rapport C/E obtenu.

### 2.3.6. Perméabilité

La perméabilité en grand d'un ouvrage intègre les défauts de continuité de l'écran. On prend pour base une valeur de  $10^{-7}$  m/s. On vérifie que le couple bentonite-ciment imposé par la déformabilité et la viscosité correspond à une perméabilité au moins dix fois plus faible en laboratoire afin de tenir compte de l'incidence éventuellement négative de la mise en œuvre sur chantier.

#### 2.3.6.1. Facteurs influant sur la perméabilité

##### a) Rapport C/E (Fig. 16)

On constate que la perméabilité diminue lorsque le rapport C/E augmente.

### 2.3.5. Strength of plastic conglomerates

The necessity of a high deformability requires a compressive strength ( $R_c$ ) as near as possible to the lateral constraint. Consequently, specifications fix a maximum 28 days strength of the order of a few times this lateral constraint (Fig. 14).

This strength must also be sufficient to resist soil stresses due to the construction and use of the dam.

- on average, for grout .....  $R_c = 100$  kPa at 28 days;  
 $R_c = 150$  kPa at 90 days;
- for plastic concrete .....  $R_c < 1\ 500$  kPa at 28 days.

#### 2.3.5.1. Parameters influencing strength

##### a) *C/W ratio*

The strength in simple compression with aging time is principally a function of the C/W ratio.

##### b) *Type of cement*

Each cement has its own  $R = f(C/W)$  relationship. Thus, for a constant C/W, using (BLF) in place of (P) will increase the strength by 50 to 100 % (Fig. 11).

##### c) *Bentonite*

It has a secondary influence.

##### d) *Proportions and grading of aggregates*

The limits on aggregate proportions have already been given (cf. § 2.3.2.1.) within these limits an increase in aggregate very clearly improves the constrained strength. On the other hand, a significant difference in the crushing strengths is not evident (Fig. 15).

#### 2.3.5.2. The effect of drying out

Drying out is considered particularly in the case of grouts. It results in a rise in the C/W ratio. The final strength corresponds to this new value of C/W.

### 2.3.6. Permeability

The overall permeability of a structure includes flaws in the continuity of the cut off wall. A basic value is taken as  $10^{-7}$  m/s. The permeability of the bentonite-cement compound of the required deformability and viscosity is checked in the laboratory to be at least 10 times lower than this value, in order to account for possible adverse occurrences during the works on site.

#### 2.3.6.1. Factors influencing permeability

##### a) *C/W ratio* (Fig. 16)

The permeability decreases as the C/W ratio increases.

b) *Teneur en agent colloïdal* (Fig. 16)

On constate qu'à C/E constant, un supplément de dosage par rapport au fuseau moyen permet de gagner jusqu'à une puissance de 10 sur les coefficients de perméabilité.

c) *Influence de la teneur en matière sèche* (Fig. 17)

Les résultats sont assez dispersés. Toutefois, l'augmentation de la teneur en charge va dans le sens de la diminution de la perméabilité.

d) *Agrégats*

Pratiquement, l'addition d'agrégats ne modifie pas la perméabilité.

e) *L'essorage*

Particulièrement pour les coulis, il y a enrichissement en bentonite et en ciment par essorage, ce qui conduit généralement à une diminution importante de la perméabilité par rapport au coulis de départ. Cet enrichissement n'est pas quantifiable *a priori* puisqu'on n'en a pas la maîtrise.

### 2.3.7. Pérennité

La pérennité des conglomerats plastiques est à considérer sous un double aspect : résistance et étanchéité, en ambiance normale et en milieu agressif.

#### 2.3.7.1. En ambiance normale

La définition de l'ambiance normale pour un matériau d'écran est :

- en partie centrale, conservation à l'abri de l'air et de l'eau (moule hermétique en laboratoire);
- sur les faces latérales, conservation en présence d'eau non agressive (milieu aqueux en laboratoire).

a) *Évolution des résistances*

Sur un échantillon, le comportement est le même en moule hermétique ou en milieu aqueux. Il y a augmentation de la résistance avec le temps (Fig. 18).

Il y a similitude de comportement des conglomerats plastiques et des bétons traditionnels.

Toutefois, il a été mis en évidence, pour chaque nature de ciment, l'existence d'un seuil, dosage minimal à définir par un essai d'érodabilité sous le gradient de service prévu en fonction des conditions locales (température de l'eau).

On peut donner comme ordre de grandeur :

- pour les ciments type (P) ..... C/E = 0,2 à 0,25;
- pour les ciments type (BLF) ..... C/E = 0,1 à 0,15.

b) *Évolution des perméabilités*

Les observations récentes sur chantiers montrent que les valeurs de perméabilités ont généralement tendance à diminuer dans le temps. Ce phénomène est probablement dû à un effet de colmatage par les fines du sol (Fig. 19).

b) *Amount of colloidal agent* (Fig. 16)

For constant C/W, an increase in the proportion of bentonite allows gains of up to a power of 10 on the coefficient of permeability.

c) *Influence of the proportion of dry matter* (Fig. 17)

The results are fairly well spread. An increase in the proportion always goes towards a reduction in permeability.

d) *Aggregates*

In practice, the addition of aggregates does not change the permeability.

e) *Drying out*

Particularly for grouts, there is an enrichment of bentonite and cement by this water loss that leads to a significant decrease in permeability with respect to the original grout. This enrichment is not quantifiable since experience is lacking.

### 2.3.7. Durability

The durability of plastic conglomerates is considered under two headings : strength and watertightness, in normal and aggressive surroundings.

#### 2.3.7.1. Normal surroundings

The definition of normal surroundings for a cut off wall material is :

- in the central core, conservation of the seal from air and water (hermetic mould in the laboratory);
- on the lateral faces, conservation in the presence of non-aggressive water (aqueous medium in the laboratory).

a) *Evolution of strength*

On test samples, the behaviour is the same in hermetic moulds as in the aqueous medium. There is an increase of strength with time (Fig. 18).

The behaviour of plastic conglomerates and traditional concretes is similar.

A single minimum proportion, defined by an erodibility test under the foreseen service hydraulic gradient as a function of local conditions (water temperature) was found for each type of cement.

The orders of magnitude may be given as :

- for (P) type cements C/W = 0.2 to 0.25;
- for (BLF) type cements C/W = 0.1 to 0.15.

b) *Evolution of permeability*

Recent site observations have shown that permeability values have a general tendency to reduce with time. This phenomenon is probably due to a clogging effect by soil fines (Fig. 19).

### 2.3.7.2. *En milieu agressif*

D'une manière générale, une paroi en matériaux plastiques résiste chimiquement aux milieux agressifs naturels courants (eaux pures, acides, saumâtres, séléniteuses) dans la mesure où l'on prend la double précaution :

- d'ajuster le liant au problème posé;
- de renforcer systématiquement la teneur en ciment et en agent de suspension.

#### a) *Eaux pures*

L'étude de conservation en présence d'eau douce montre que la perte de résistance est d'autant plus importante que l'on se rapproche des liants purs. Les coulis à faible C/E se comportent bien (Fig. 20).

#### b) *Eaux séléniteuses*

Les essais en laboratoire ont montré que le lessivage par une eau séléniteuse était sans effet sur la perméabilité et sur la résistance, après choix convenable du couple ciment-bentonite.

### 2.3.8. **Érodabilité**

Un conglomérat plastique soumis aux essais par « pin-holes test » peut être considéré comme résistant à l'érosion lorsque :

- la résistance à la compression (résistance finale) s'élève à 35 kPa minimum;
- le gradient hydraulique ne dépasse pas 30.

Ces conditions sont généralement remplies.

## 2.4. **SLURRY TRENCH**

### 2.4.1. **Composition**

Le conglomérat est composé de boue bentonitique de forage additionnée d'agrégats généralement issus de la perforation :

- *Boue bentonitique* : sa viscosité doit être supérieure à 40 s et les pertes en eau ne doivent pas dépasser 15 cm<sup>3</sup> en 30 mn. Le pourcentage de bentonite est compris entre 5 et 15 %.
- *Agrégats* : ils doivent composer une granulométrie continue allant de 30 cm à 0,02 mm. Au besoin, on ajoute des agrégats d'apport pour ajuster la granulométrie.

Le mélange est fait au pousseur, sur le bord de la tranchée, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène donnant un affaissement au cône de 10 à 20 cm.

### 2.4.2. **Perméabilité**

On considère que la perméabilité de l'écran dépend uniquement du matériau. Elle dépend :

- de la quantité de bentonite (si besoin, on ajoute de la bentonite sèche lors du mélange);
- du type de sol.

### 2.3.7.2. In the aggressive medium

A diaphragm wall in plastic materials will generally chemically resist natural aggressive media (pure, acid, brackish and selenitic water) in proportion to the extent of the precautions taken, especially the following two :

- adjusting the binder to the prevalent problem;
- systematically increasing the dry matter, cement and suspension agent.

#### a) *Soft water*

Study of stability in the presence of soft water shows the strength loss is more especially significant as one approaches pure binder. Grouts with low C/W behave well (Fig. 20).

#### b) *Sulphate bearing water*

Laboratory tests have shown that contact with sulphate bearing water has no effect on the strength or permeability, if a suitable bentonite-cement combination has been chosen.

### 2.3.8. Erodibility

A plastic conglomerate submitted to the « pin hole test » may be considered as erosion resistant when :

- its compressive strength (final strength) reaches at least 35 kPa;
- the hydraulic gradient does not exceed 30;

These conditions are generally fulfilled.

## 2.4. SLURRY TRENCH

### 2.4.1. Composition

The conglomerate is composed of bentonitic drilling slurry with added aggregates produced by the excavation :

- *Bentonitic slurry* : its viscosity must be greater than 40 s and water losses must not exceed 15 cm<sup>3</sup> in 30 mn. The percentage of bentonite is between 5 and 15 %.
- *Aggregates* : They must have a continuous grading, varying between 3 cm and 0.02 mm. If necessary, aggregates may be brought in and added to adjust the grading.

The mixture is made with a bull-dozer beside the trench until a homogeneous material with a cone slump of 10 to 20 cm is obtained.

### 2.4.2. Permeability

The permeability of the cut off wall is considered to depend solely on the material. This depends on :

- the quantity of bentonite (if necessary dry bentonite can be added to the mixture);
- the soil type.

---

## 3. MISE EN ŒUVRE

---

### 3.1. FABRICATION ET MISE EN ŒUVRE

#### 3.1.1. Préparation des coulis bentonite-ciment (Fig. 21)

Les coulis sont généralement fabriqués dans des centrales composées des éléments suivants :

- silos de stockage du ciment et de la bentonite;
- silos de stockage de boue primaire bentonite-eau;
- silos de stockage de coulis proprement dit;
- système de brassage, de pesage, de dosage, pompes, canalisations, etc.

De plus en plus, les centrales sont à fonctionnement automatisé, ce qui assure une meilleure régularité du produit fini. Le débit normal d'une centrale type est situé dans la fourchette de valeurs 20-50 m<sup>3</sup>/h.

#### 3.1.2. Préparation des conglomérats plastiques (Fig. 21)

En général, on part d'un coulis bentonite-ciment auquel on ajoute les agrégats.

Cet ajout est fait dans une centrale analogue à celle utilisée pour les bétons classiques. La précision des dosages obtenus est comparable.

Le conglomérat est ensuite acheminé sur le lieu d'utilisation par camion-benne, toupie, pompe. Le débit usuel est situé entre 20 et 40 m<sup>3</sup>/h.

#### 3.1.3. Autre mode de préparation des conglomérats plastiques

Le conglomérat plastique est fabriqué à partir de boue de perforation récupérée : dans ce cas, un camion-toupie est alimenté en boue de récupération sur le site et reçoit, en centrale, un mélange préalablement homogénéisé de ciment et d'agrégats.

Le malaxage est alors assuré par le camion-toupie, la centrale fixe ne servant que d'organe de dosage du ciment et de l'agrégat.

Cette méthode est peu fiable dans la mesure où le dosage en boue ainsi que sa viscosité sont assurés avec moins de précision.

#### 3.1.4. Slurry trench

La perforation est faite avec une pelle retro, une dragline ou une trancheuse sous boue bentonitique. Un racleur assure le décapage du rocher, un émulseur à air assure le nettoyage du substratum. Les déblais sont repris et mélangés au sol avec un matériau d'apport qui a pour objet de réajuster la granulométrie, puis poussés dans la tranchée. On opère le plus souvent à l'avancement, le déversement des agrégats (lesquels prennent dans la saignée un angle de talus naturel) ayant lieu avec

---

## 3. EXECUTION

---

### 3.1. PRODUCTION AND EXECUTION

#### 3.1.1. Preparation of the bentonite-cement grout (Fig. 21)

Grouts are generally prepared at plants comprising the following elements :

- cement and bentonite storage silos;
- bentonite-water primary slurry storage silos;
- silos for storage of the actual grout;
- mixing, weighing and batching systems, pumps and pipes, etc.

These plants are becoming more and more automated, assuring the best regularity of the finished product. The normal output of a typical plant is within the range 20 — 50 m<sup>3</sup>/h.

#### 3.1.2. Preparation of plastic conglomerates (Fig. 21)

In general, aggregates are added to a bentonite-cement grout.

This operation is carried out with plant similar to that used for normal concrete. Comparable batching precision is obtained.

The mix is taken to the site by tipper truck, mixer truck or by pumping. The usual rate is between 20 to 40 m<sup>3</sup>/h.

#### 3.1.3. Other method of preparation for plastic conglomerates

The plastic conglomerate is produced from recovered drilling slurry. In this case, a mixer truck is loaded with recovered slurry at the site, to which is added previously mixed cement and aggregates at the plant.

Mixing is then carried out by the mixer truck; the fixed plant only batching the cement and aggregates.

This method is not very accurate in the slurry batching just as the viscosities cannot be assured to great precision.

#### 3.1.4. Slurry trench

The excavation is made with a rear mounted bucket, a dragline or a ditcher under bentonite slurry. A scraper ensures scouring of the rock. An air emulsifier ensures cleaning of the substratum. The debris are removed and mixed with soil and material brought in to adjust the grading, then pushed into the trench.

Usually, the operation is carried out continuously, the refill with aggregate

un décalage suffisant sur la perforation pour que la base du talus soit en retrait du forage. Une homogénéisation du tout est assurée par un moyen quelconque (tarière, mouvement du kelly...).

## **3.2. POINTS PARTICULIERS**

### **3.2.1. Épaisseur de la paroi**

La détermination de l'épaisseur de la paroi est tout d'abord fonction de l'importance de la charge hydraulique à laquelle elle sera soumise.

Mais la fixation d'un gradient maximum n'apparaît pas comme un élément suffisant de choix. Il faut, en effet, admettre que pendant la vie de l'ouvrage et plus particulièrement pendant sa construction et les premiers mois de la mise en service, l'organe d'étanchéité peut être soumis à des déformations non uniformes consécutives à l'adaptation de l'ensemble ouvrage-terrain de fondation.

De telles déformations discontinues peuvent éventuellement survenir localement et aussi à l'occasion de phénomènes sismiques. On voit l'importance que prend alors la notion d'épaisseur de l'écran d'étanchéité par son adaptation à l'amplitude d'une éventuelle discontinuité de déformation.

Les matériels existants permettent de réaliser couramment des coupures jusqu'à 1,50 m d'épaisseur.

### **3.2.2. Raccordement en profondeur**

La paroi d'étanchéité est en général raccordée en profondeur à un horizon de terrain d'étanchéité satisfaisante.

Il peut être nécessaire de compléter le raccordement entre coupure et substratum par un traitement de collage par injection si l'encastrement de l'écran dans le substratum étanche ne peut être fait sur une hauteur suffisante garantissant l'absence de tout risque de contournement. Une telle injection peut être réalisée au moyen de forages exécutés dans le terrain encaissant de part et d'autre de la paroi ou à travers des tubes laissés en attente dans la paroi elle-même. On évitera en général de réaliser des forages directement dans l'épaisseur de la paroi elle-même, étant donné d'une part la quasi-impossibilité de les maintenir à l'intérieur de cette dernière, et d'autre part le risque de désorganiser le matériau lui-même pendant la perforation.

### **3.2.3. Raccordement en tête**

Le raccordement de la paroi constituant l'organe d'étanchéité dans le terrain de fondation de l'ouvrage avec l'organe d'étanchéité de l'ouvrage lui-même en superstructure, peut poser un problème délicat. En effet, si le raccordement de la paroi au noyau central d'un barrage peut être résolu par exemple en réalisant la coupure étanche à partir et à travers les premières levées du noyau, le raccordement à un masque d'étanchéité amont doit requérir une attention toute particulière (Fig. 22).

(which adopts a natural slope angles in the trench) being sufficiently far behind the excavation for the base of the slope to be clear of it. The whole is kept homogeneous by any means (auger, movement of the Kelly, etc.).

## **3.2. SPECIAL POINTS**

### **3.2.1. Thickness of the diaphragm**

The determination of the thickness of the diaphragm wall is first of all a function of the size of the hydraulic load to which it will be subjected.

But fixing a maximum hydraulic gradient is not sufficient. It must be considered that during the life of the structure, and more especially during construction and the first few months of service, the waterproofing structure may undergo non-uniform deformations resulting from the behaviour of the structure foundation ensemble.

Such deformations may possibly occur locally and also with seismic phenomena. The importance is apparent then, of considering the concept of cut off wall thickness by its ability to sustain possible non-uniform deformations.

Existing machines allow cut off walls of up to 1.50 m thick to be readily produced.

### **3.2.2. Bond at depth**

A watertight diaphragm wall is generally bonded at depth to a stratum of satisfactory impermeability.

It may be necessary to complete the cut off wall substratum bond by grouting if the embedment of the wall in the substratum is not adequate to guarantee that there will be no risk of flow below or around the end of the wall. This grouting may be carried out by means of boreholes in the surrounding ground each side of the wall, or outwards from tubes left in the wall itself. Making boreholes directly into the wall itself is generally avoided, given that it is practically impossible to keep them within the wall, and also the risk of disrupting the material during drilling.

### **3.2.3. Bonding at the top**

The bond between the diaphragm wall constituting the watertight element in the ground and the watertight element of the structure itself can pose a delicate problem. If the bond of the wall to the central core of the dam is resolved, for example, by producing a cut off wall up through the first layers of the core, the bond to the upstream waterproof facing will require particular attention (Fig. 22).

---

## 4. CONTROLES

---

### 4.1. DÉROULEMENT DES CONTROLES - GÉNÉRALITÉS

La fabrication doit être contrôlée à tous les stades :

- A l'arrivée des matériaux (caractéristiques).
- Avant le stockage de la boue mère (densité et teneur en argile).
- A la production du mélange boue-ciment (quantités relatives de chaque constituant).
- Pour les coulis bentonite-ciment, contrôle de la viscosité Marsh et de la rigidité.
- Pour les bétons plastiques, enregistrement à la centrale de malaxage des quantités de sable, de graviers et d'eau additionnelle. La correction, en ce qui concerne cette dernière est faite en rapportant la quantité d'eau indiquée par lecture de la sonde hygrométrique placée sur la trémie des sables. Puis on vérifie l'affaissement au slump-test à la sortie du malaxeur.
- Sur le matériau durci : on peut par exemple soumettre un premier échantillon à un essai de compression simple au bout de sept jours. L'intérêt de cet essai est que l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps étant connue, on peut rapidement déceler une éventuelle anomalie et aussitôt, effectuer les corrections nécessaires.

L'ensemble de ces contrôles permet d'obtenir un matériau qui présente effectivement les caractéristiques requises. Après l'achèvement des travaux il est nécessaire de continuer les contrôles pour savoir comment le mur-parafouille se comporte et comment il évolue en fonction du temps.

### 4.2. CONTROLE DE LA FABRICATION

#### 4.2.1. Fonctionnement de la centrale de fabrication

Après avoir réglé les temps de chacun de cycles de fabrication, de façon à obtenir le rendement maximal, la première opération de contrôle consiste à étalonner les balances et à vérifier l'exactitude des dosages effectués automatiquement.

#### 4.2.2. Contrôles des matériaux

Les différentes livraisons d'argile, de ciment et d'adjuvants font l'objet en laboratoire de contrôles de qualité systématiques.

- *Bentonite* : le rendement garanti par le fournisseur est contrôlé sur chaque livraison.
- *Ciment* : le laboratoire établit les courbes caractéristiques à 7, 28 et 90 jours des différentes livraisons.
- *Adjuvants* : la reproductibilité des propriétés de fluidification et retard de prise est vérifiée sur des pâtes argile-ciment témoins.

---

## 4. CHECKING AND CONTROLS

---

### 4.1. DEVELOPMENT OF CHECKS - GENERAL

Production must be checked at all stages :

- On delivery of material (characteristics).
- Before storage of the basic slurry (density and clay content).
- On production of the slurry-cement mixture (relative quantities of each constituent).
- For bentonite-cement grouts, check of Marsh viscosity and rigidity.
- For plastic concretes, recording at the mixing plant the quantities of sand, gravel and additional water. The correction of the latter is made in proportion to the reading of the hygrometric sensor placed on the sand chute. Then a slump test is carried out after mixing.
- On the hardened material, one can, for example, subject a sample to a simple compressive test at 7 days. The interest of this test is that if the evolution of compressive strength with time is known, any possible anomalies can be revealed, and necessary corrections carried out straight away.

Together, these checks allow production of a material effectively presenting the requisite characteristics. After the end of work, it is necessary to continue checking in order to know how the wall is behaving and how it changes in time.

### 4.2. PRODUCTION CONTROL

#### 4.2.1. Functioning of the production plant

After having regulated the time of each production cycle, so as to obtain maximum output, the first control operation is to calibrate the scales and to check the accuracy of the batches carried out automatically.

#### 4.2.2. Checking of materials

The deliveries of clay, cement and admixtures are systematically checked for quality in the laboratory :

- *Bentonite* : the dosage guaranteed by the supplier is checked at each delivery.
- *Cement* : the laboratory establishes the 7, 28 and 90 day characteristic curves for the various deliveries.
- *Admixtures* : the reproducibility of plastification and set retarding properties is checked on clay-cement paste samples.

### 4.2.3. Contrôle du coulis frais

Bien qu'il n'existe pas de normes relatives à l'étude de ces matériaux plastiques, les mesures effectuées au laboratoire sont déterminées à partir des normes françaises, allemandes et anglo-saxonnes relatives aux bétons et aux sols, et aussi des normes américaines telles que les normes A.P.I.

#### 4.2.3.1. Densité

Les essais se font à la balance à boue, à la balance de Roberval ou mieux avec un gammadensimètre. Ce dernier présente l'avantage de permettre des études sédimentométriques sur le coulis frais et les échantillons de coulis durci.

Le contrôle systématique des densités permet de déceler une éventuelle anomalie dans l'étalonnage des balances de la centrale ou des erreurs de dosage.

#### 4.2.3.2. Viscosité

On estime la viscosité Marsh d'un fluide en mesurant le temps que met un volume déterminé de ce fluide placé dans un récipient de forme donnée pour s'écouler à travers un ajutage de dimensions connues. La procédure d'essais est conforme aux normes de l'American Petroleum Institute (A.P.I.). Ce contrôle est l'un des plus importants, puisque l'on sait qu'il est essentiel pour les coulis de respecter une viscosité donnée (40 s en fin de fabrication, 50 s en fin de perforation).

#### 4.2.3.3. Rigidité, temps de prise

Les mesures ont pour but de déterminer le seuil de maniabilité du coulis ainsi que son temps de prise. Le principe de l'essai consiste à déterminer la contrainte de rupture du matériau lorsque celui-ci est soumis à un effort de cisaillement.

Les mesures sont faites avec un scissomètre. Nous proposons que le seuil de maniabilité d'un coulis soit défini de façon empirique, ce dernier devant posséder une rigidité inférieure à 0,5 g/cm<sup>2</sup>. De la même manière, il est défini qu'un coulis fait prise lorsque la rigidité atteint 2,5 g/m<sup>2</sup> (250 Pa).

#### 4.2.3.4. Ressuée ou mesure de stabilité

Le principe est la mesure du volume d'eau obtenu par décantation de l'échantillon pendant un temps déterminé.

Le coefficient de ressuee admissible :

$$\frac{\text{Vol. d'eau surnageante}}{\text{Vol. initial de fluide}}$$

pour les coulis de ciment non retardés et les boues bentonitiques est de 4 %.

#### 4.2.3.5. Essorage

Il s'agit de mesurer le volume d'eau essorée et l'épaisseur du cake formé lorsqu'on applique une pression donnée sur un volume connu du fluide pendant un temps déterminé. L'appareil le plus utilisé est le filtre-presse BAROID permettant la réalisation d'essais conformes aux normes A.P.I.

### 4.2.3. Checking of fresh grout

Since there exist no standards for the study of these plastic materials, laboratory procedures are derived from French, German and British concrete and soils standards and U.S. Standards such as the A.P.I. standards.

#### 4.2.3.1. Density

The tests are carried out with a mud balance, a Roberval balance or preferably with a gammadensimeter. The latter has the advantage of allowing sedimentation studies to be carried out on fresh grout and samples of hardened grout.

Systematic checking of densities reveals any possible anomalies in the calibration of scales at the batching plant, or batching errors.

#### 4.2.3.2. Viscosity

The Marsh viscosity of a fluid is estimated by measuring the time taken for a known volume of the fluid placed in a container of given form to flow through a nozzle of known dimensions. This test procedure complies with American Petroleum Institute (A.P.I.) Standards. This check is one of the most important, since it is essential for the grout to conform to a given viscosity (40 s at the end of production, 50 s at the end of excavation).

#### 4.2.3.3. Rigidity, set time

The measures are aimed at determining the workability limit of the grout and its set time. The principle of the test is to determine the failure stress of the material when submitted to a shear force.

The measurements are made with a scissometer. We propose that the workability limit of a grout must be defined empirically; and corresponds to a rigidity of 50 Pa. In the same way, it is defined that a grout has set when its rigidity reaches 250 Pa.

#### 4.2.3.4. Bleeding or measure of stability

The principle is to measure the volume of water obtained by decantation of the sample during a predetermined length of time.

The coefficient of admissible bleeding :

$$\frac{\text{Vol. of surface water}}{\text{Initial vol. of fluid}}$$

for non-retarded cement grouts and bentonite slurries is 4 %.

#### 4.2.3.5. Drying out by filtration

The volume of water lost, and the thickness of the cake formed, when a given pressure is applied to a known volume for a known time are measured. The apparatus most often used is the Baroid filter-press which allows A.P.I. Standard test to be performed.

### **4.3. ESSAIS SUR MATÉRIAU DURCI**

Les échantillons prélevés lors de la mise en œuvre sont conservés en moules hermétiques jusqu'à la date des différents essais.

#### **4.3.1. Résistance en compression simple**

Elle se définit comme étant la contrainte de compression monoaxiale que peut subir un matériau pour amener celui-ci à la rupture. Le but de la manipulation est de déterminer la charge appliquée, sur une éprouvette de dimension et de forme connues. Directement lié à la mesure de résistance en compression simple, le module d'élasticité (module d'Young) est également calculé.

Les essais sont réalisés en accord avec les normes (AFNOR ou autres). Les contrôles sont effectués à 7, 28 et 90 jours.

#### **4.3.2. Résistance en compression triaxiale**

Le but de cet essai est de tracer la courbe intrinsèque spécifique du matériau pour en déduire la cohésion et l'angle de frottement interne.

Sur les coulis base ciment, on réalise :

- l'essai consolidé non drainé (C.U.) : c'est celui qui, théoriquement se rapproche le plus des conditions d'emploi dans le cas d'une paroi;
- l'essai non consolidé, non drainé (U.U.).

#### **4.3.3. Perméabilité**

Le principe consiste à mesurer le volume d'eau de percolation à travers un échantillon de dimensions données pendant un temps déterminé et sous une pression connue. En appliquant la loi de Darcy à cet écoulement, on en déduit le coefficient de perméabilité cherché.

L'appareil est un perméamètre à membrane. Le contrôle a lieu en général à 28 jours.

#### **4.3.4. Érodabilité (Fig. 23)**

L'essai type est le « pin-hole test » défini par J. L. Sherard (\*). Il s'agit d'observer l'écoulement pendant un temps déterminé sous différents gradients à travers un orifice percé dans l'échantillon. Toutefois, cet essai est peu représentatif du réel :

- trou circulaire d'où effet de voûte entre les grains;
- étreinte latérale (pour assurer l'étanchéité);
- durée limitée;
- eau non chargée.

---

(\*) USBR Report REC/ERC, 82-12, sept. 1982.

### **4.3. TESTS ON THE HARDENED MATERIAL**

Samples taken at the time of placing are kept in hermetically sealed molds until the dates of the various tests.

#### **4.3.1. Crushing strength**

This is defined as being the monoaxial compressive stress at which a material will fail. The aim is to determine the applied load, on a test sample of known dimensions and form. Directly related to the simple compressive strength, the modulus of elasticity (Young's modulus) is calculated.

The tests are carried out according to standards (AFNOR or others).

#### **4.3.2. Triaxial compressive strength**

The aim of this test is to trace the specific intrinsic curve for the material to deduce the cohesion and angle of internal friction.

On cement based grouts, the following are carried out :

- the consolidated undrained (C.U. test) being the one which theoretically, most closely represents the conditions in the walls;
- the unconsolidated undrained (U.U.) test.

#### **4.3.3. Permeability**

The principle is to measure the volume of water percolating through a sample of known dimensions during a known time under a known pressure. Applying Darcy's Law to this seepage, the coefficient of permeability is deduced.

The apparatus is a membrane permeameter. The test takes place at 28 days.

#### **4.3.4. Erodibility (Fig. 23)**

This is the « pin hole test » as defined by J. L. Sherard\*. Seepage under various gradients across a hole pierced in a sample is observed over a predetermined length of time. This test is not very representative of practice because :

- circular hole with arching effect between the grains;
- lateral restraint (to ensure watertightness);
- limited duration;
- water not charged.

---

(\*) USBR Report REC/ERC 82-12, sept. 1982.

## **4.4. CONTROLES *IN SITU***

### **4.4.1. Déformation de l'ouvrage**

Plusieurs dispositifs d'auscultation permettent de suivre les déplacements, les principaux sont les extensomètres, les clinomètres et les tassomètres.

#### *4.4.1.1. Extensomètre*

Ce type de matériel constitue un appareillage d'auscultation extrêmement fiable et précis : après étalonnage, l'erreur sur le déplacement relatif est de 0,1 mm.

#### *4.4.1.2. Clinomètre*

Il se compose essentiellement d'une tige flexible en acier comportant un pendule à sa partie libre et encastrée dans le corps de l'appareil à sa partie supérieure. Sur la tige, sont fixées, dans deux plans diamétraux perpendiculaires, quatre cordes vibrantes. Lorsque l'appareil est incliné, cette inclinaison engendre une flexion de la tige et des sollicitations dans les cordes vibrantes. Dès lors, il suffit de mesurer la variation de fréquence de vibrations pour en déduire l'inclinaison de la sonde par rapport à la verticale. Cet appareil peut fonctionner dans l'eau.

En prenant certaines précautions, lors de la mise en œuvre visant à s'affranchir au maximum de toutes les erreurs systématiques ou aléatoires, on peut considérer que pour une sonde de  $L = 0,75$  m, l'erreur constante avec la profondeur est d'environ  $\pm 1$  mm.

#### *4.4.1.3. Tassomètre*

Ces appareils sont destinés à mesurer les déplacements verticaux. Il existe de nombreux modèles dont la précision est de l'ordre du millimètre.

### **4.4.2. Niveaux piézométriques**

La propriété fondamentale de la paroi étant son étanchéité d'ensemble, le critère essentiel de l'efficacité est le débit résiduel recueilli à l'aval de l'écran. Celui-ci pourra être déterminé à l'aide d'un double réseau de piézomètres disposés de part et d'autre de l'écran et judicieusement crépinés.

L'analyse chimique et physique des eaux sera quelquefois utile pour préciser leur provenance. Un tel dispositif peut rester indéfiniment en place et permet de suivre l'évolution du barrage dans le temps : si un incident se produit à long terme, il permet de localiser les fuites, donc de faciliter les réparations.

Il existe de très nombreux modèles de piézomètres de conceptions diverses et plus ou moins élaborés. La partie crépinée doit être isolée du restant du forage sur 1 ou 2 m de hauteur, par un manchon étanche constitué d'argile ou d'un coulis argile-ciment.

Le temps de réponse d'un piézomètre, c'est-à-dire le temps que met le niveau de la nappe pour s'équilibrer dans le tube, est très variable, de quelques dizaines de minutes à plusieurs jours, et dépend étroitement de la perméabilité du terrain et de la qualité d'exécution du forage.

#### **4.4. INSTRUMENTATION FOR OBSERVATION OF DIAPHRAGM WALLS BEHAVIOUR**

##### **4.4.1. Deformations of the structure**

Several pieces of sounding equipment allow displacement to be observed; the main ones being strain gauges, inclinometers, and settlement gauges.

###### *4.4.1.1. Strain gauge*

This type of equipment is a sounding apparatus extremely delicate and precise; after calibration, the error on relative displacements is 0.1 mm.

###### *4.4.1.2. Inclinometer*

Essentially, this is composed of a flexible steel rod carrying a pendulum on its free part, and embedded in the body of the apparatus in the upper part. On the rod are fixed, in two diametrically perpendicular planes, four vibrating cords. When the apparatus is inclined a flexion is induced in the rod and stresses in the vibrating cords. It is then only a matter of measuring the change in the frequency of vibrations to deduce the inclination of the probe with respect to the vertical. This equipment can operate under water.

By taking certain precautions when placing, removing as many errors and risks as possible, one can consider, for a probe of  $L = 0.75$  m, a constant error with depth of about  $\pm 1$  mm.

###### *4.4.1.3. Settlement gauge*

This equipment is designed to measure vertical displacements. There are various models with a precision of the order of a millimetre.

##### **4.4.2. Piezometric levels**

The fundamental property of the wall being its overall watertightness, the essential criterion for the efficiency is the residual discharge collected downstream of the cut off wall. This can be determined by a double network of piezometers disposed on either side of the wall, and well protected by filters.

Chemical and physical analyses of the water will sometimes be useful to pinpoint their source. Such an arrangement may stay indefinitely and allow monitoring of the evolution of the dam with time; if an incident arises in the long term, it will allow the location of leaks, thus facilitating repairs.

There are many models of piezometers of various designs, some more and some less elaborate. The filter part must be isolated from the borehole over a height of 1 or 2 meters by a watertight collar of clay or cement-clay grout.

The response time of a piezometer, that is the time for the water level to stabilise in the tube, is very variable : from a few tens of minutes to several days and depending strictly on the permeability of the ground and the quality of borehole execution.



---

## ANNEXES

---

### Tableaux

1. Classification européenne des ciments
2. Classification américaine des ciments
3. Rigidité en  $\text{g/cm}^2$  au temps  $t$

### Figures

1. Paroi à la bentonite
2. Paroi en béton
3. Paroi au coulis
4. Diagramme de Rankin
5. Résistance à 90 jours de coulis à différents C/E
6. Évolution de la rigidité au repos
7. Perte d'eau par essorage (sous 75 kPa)
8. Réduction de l'essorage (sous 50 kPa)
9. Forme générale de la relation contrainte-déformation
10. Essais triaxiaux sur des bétons plastiques
11. Essais triaxiaux sur des bétons plastiques
12. Déformation à la rupture en fonction de la vitesse d'écrasement
13. Comparaisons entre coulis, mortiers et bétons
14. Déformation à la rupture des conglomerats plastiques
15. Relation entre la résistance et la teneur en agrégats du béton dans l'essai triaxial
16. Influence du rapport C/E et de la teneur en agent colloïdal sur la perméabilité des coulis bentonite-ciment
17. Influence de charges diverses sur le coefficient de perméabilité des coulis base ciment
18. Variation de la résistance à la compression dans le temps de mélanges plastiques
19. Évolution de la perméabilité au cours du temps de 3 coulis
20. Perte de résistance d'échantillons de coulis conservés en eau distillée, par rapport aux témoins conservés en moule hermétique

---

## APPENDICES

---

### Tables

1. European classification of cements
2. US classification of cements
3. Rigidity in  $\text{g/cm}^2$  at time  $t$

### Figures

1. Slurry trench
2. Concrete diaphragm wall
3. Grout diaphragm wall
4. Rankin diagram
5. 90 days strengths of grouts with various C/W ratios
6. Evolution of rigidity at rest
7. Water loss through filtration (under 75 kPa)
8. Reduction of filtration (under 50 kPa)
9. General form of the stress-strain relationship
10. Triaxial tests on plastic concretes
11. Triaxial tests on plastic concretes
12. Strain to rupture as a function of crushing rate.
13. Comparisons between grouts, mortars and concrete
14. Deformation to failure of plastic conglomerates
15. Relationship between strength and aggregate content for concrete in triaxial testing
16. Influence of C/W ratio and colloidal agent on permeability of cement-bentonite grouts
17. Influence of various additions on the coefficient of permeability of basic cement grout
18. Variation in compressive strength of plastic mixtures with time
19. Evolution of permeability with time for 3 grouts
20. Loss of strength of grout samples stored in distilled water, with respect to control samples kept in a hermetic mould

21. Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale à conglomérats plastiques
22. Exemple de réalisation d'un dispositif de raccordement écran amont/masque
23. Essai d'érodabilité des sols à grains fins. Méthode de J. L. Sherard

21. Diagram of the working principle of a plastic conglomerate plant
22. Example of upstream cut off wall/facing bond
23. Erodibility test for fine grained soils. J. L. Sherard method

Tableau 1/*Table 1*  
 CLASSIFICATION EUROPÉENNE DES CIMENTS  
 EUROPEAN CLASSIFICATION OF CEMENTS

ABRÉVIATION/ <i>ABBREVIATION</i>	DÉNOMINATION/ <i>NAME</i>	COMPOSITION
<i>P</i>	Portland	≥ 95 % clinker
<i>P.Co.</i>	Portland composé <i>Compound Portland</i>	≥ 65 % clinker
<i>P.Sl.</i>	Portland au laitier <i>Portland with slag</i>	& ≤ 35 %
<i>P.Fl.</i>	Portland aux cendres volantes <i>Portland with fly ash</i>	Autres constituants <i>Other constituents</i>
<i>P.Po.</i>	Portland à la pouzzolane <i>Pozzolanic Portland</i>	
<i>BLF</i>	De haut-fourneau <i>Blast Furnace</i>	
<i>POZ</i>	Pouzzolanique <i>Pozzolanic</i>	Clinker & pouzzolane <i>Clinker &amp; pozzolanic</i>

Tableau 2/ Table 2  
 CLASSIFICATION AMÉRICAINNE DES CIMENTS  
 US CLASSIFICATION OF CEMENTS

TYPE	NAME	COMPOSITION
Ito V	Portland Cements	> 93 % clinker + calcium sulfate
BLENDED HYDRAULIC CEMENTS		
IS	Portland blast-furnace Slag cement	25 % < slag < 70 %
S	Slag cement	Slag > 70 %
I (SM)	Slag modified Portland cement	Slag < 25 %
IP	Portland-Pozzolan cement (1)	15 % < Pozzolan < 70 % (2) and 15 % < slag < 60 %
I (PM)	Pozzolan-modified Portland cement (1)	Pozzolan < 15 % (2) and 20 % < slag < 70 %

(1) Pozzolan may be added to cement type I to V or to cement type IS.  
 (2) Valuable when Pozzolan is added to cement type IS according to ASTM C 150-83 a and C 595-83.

Tableau 3/ Table 3

Craie en g/l de mélange coulis-craie Chalk in g/l of grout/chalk mixture	Rigidité en g/cm <sup>2</sup> au temps <i>t</i> Rigidity in g/cm <sup>2</sup> at time <i>t</i> (1 g/cm <sup>2</sup> ≈ 100 Pa)					
	t = 0	t = 1 h	t = 20 h	t = 24 h	t = 36 h	t = 48 h
0	0.021	—	—	0.450	—	1.47
185	0.040	0.294	—	0.882	—	10.6
350	0.090	0.882	—	24.0	—	329.0
850	1.47	—	64	110.0	352	—

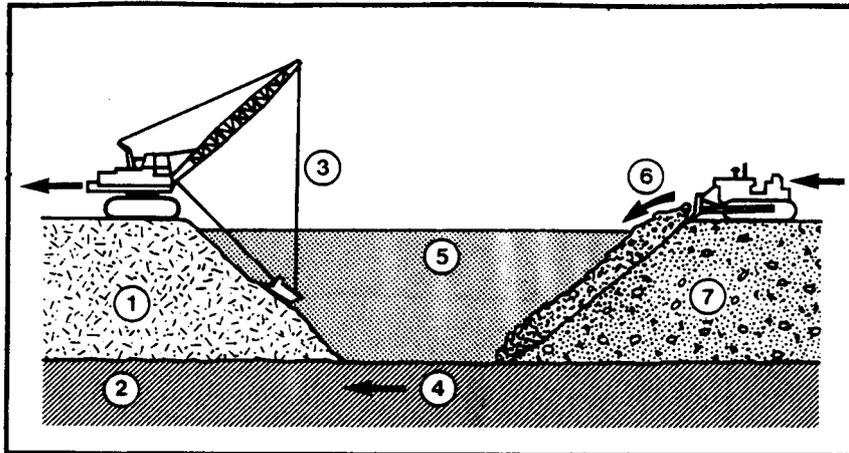


Fig. 1  
Paroi à la bentonite  
*Slurry-trench*

- |   |   |
|---|---|
| (1) Terrain vierge perméable.             | (1) <i>Permeable virgin ground.</i>             |
| (2) Substratum.                           | (2) <i>Substratum.</i>                          |
| (3) Extraction et creusement.             | (3) <i>Excavation.</i>                          |
| (4) Sens d'avancement.                    | (4) <i>Direction of progress.</i>               |
| (5) Saignée remplie de boue bentonitique. | (5) <i>Trench filled with bentonite slurry.</i> |
| (6) Déversement des agrégats.             | (6) <i>Filling with aggregates.</i>             |
| (7) Tranchée terminée.                    | (7) <i>Finished trench.</i>                     |

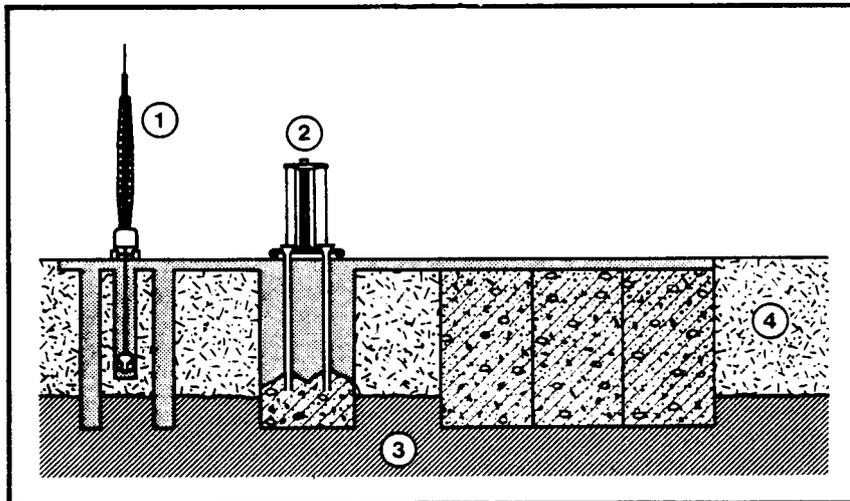


Fig. 2  
Paroi en béton  
*Concrete diaphragm wall*

- |                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| (1) Creusement.        | (1) <i>Excavation.</i>      |
| (2) Bétonnage.         | (2) <i>Concreting.</i>      |
| (3) Substratum.        | (3) <i>Substratum.</i>      |
| (4) Horizon perméable. | (4) <i>Permeable layer.</i> |

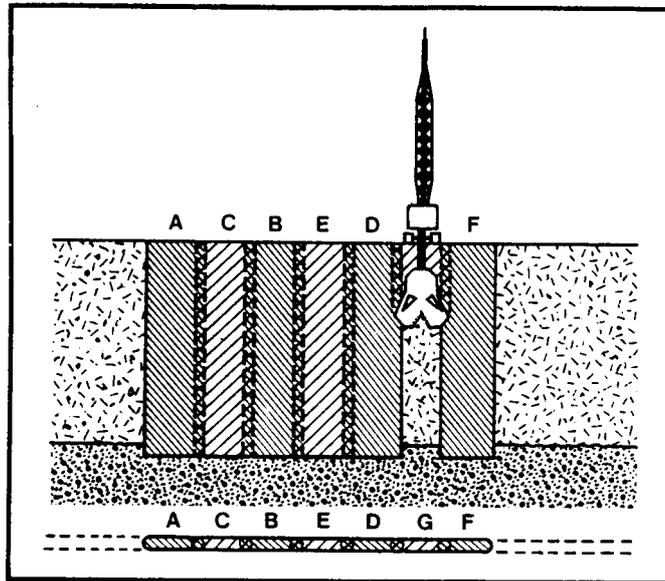


Fig. 3

Paroi au coulis

*Grout diaphragm wall*

A-B-C ... F-G : Ordre d'exécution des panneaux.

*A-B-C ... F-G : Order of execution of panels*

A-B-D-F : Panneaux primaires

*A-B-D-F : Primary panels*

C-E-G : Panneaux secondaires

*C-E-G : Secondary panels*

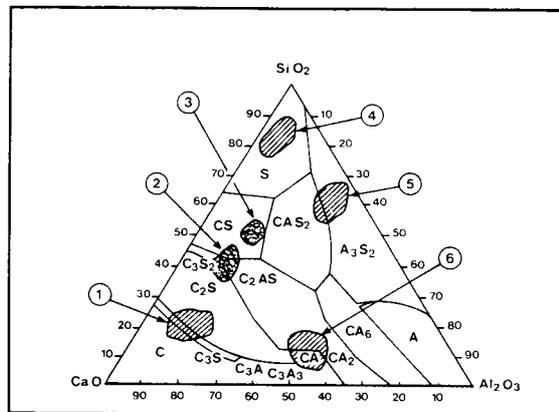


Fig. 4

Diagramme de Rankin

*Rankin diagram*

(1) Ciments Portland.

*(1) Portland cements.*

(2) Laitiers basiques.

*(2) Basic binders.*

(3) Laitiers acides.

*(3) Acidic binders.*

(4) Verre.

*(4) Glass.*

(5) Cendres volantes.

*(5) Fly ash.*

(6) Ciment alumineux.

*(6) Aluminous cement.*

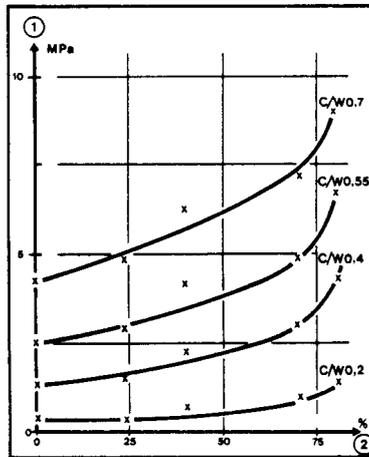


Fig. 5

Résistance à 90 jours de coulis à différents C/E  
en fonction de la teneur en laitier du ciment employé  
*90 days strengths of grouts with various C/W ratios  
as a function of the slag content of the cement used*

- (1) Résistance à la compression simple. (1) Strength in unconfined compression.  
(2) Pourcentage de laitier. (2) Percentage of slag.

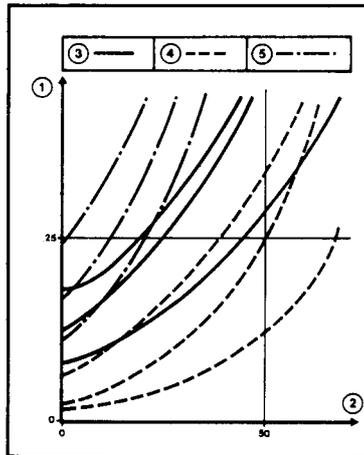


Fig. 6

Évolution de la rigidité au repos  
*Evolution of rigidity at rest*

- (1) Rigidité en Pa; (1) Rigidity in Pa.  
(2) Temps en minutes. (2) Times in minutes.  
(3) (4) (5) Boues-ciment préalablement agitées  
durant 2 heures, rapport C/E constant  
= 0,4, ciment et bentonite variables. (3) (4) (5) Cement slurries previously mixed for  
2 hours, C/W ratio constant at 0.4,  
cement and bentonite variable.  
(3) Ciment type (P). (3) (P) Type cement.  
(4) Ciment type (BLF) avec 70% de laitier. (4) (BLF) Type cement with 70 % slag.  
(5) Ciment type (BLF) avec 50 % de lai-  
tier. Bentonite C 7 S pour (3) et (4) et  
CV 15 pour (5). (5) (BLF) Type cement with 50 % slag.  
Bentonite C 7 S for (3) and (4), and  
CV 15 for (5).

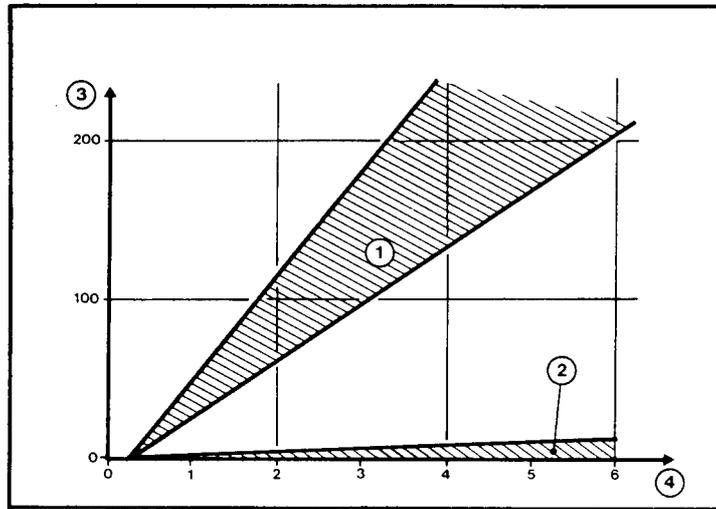


Fig. 7

Perte d'eau par essorage (sous 75 kPa)  
*Water loss through filtration (under 75 kPa)*

- |   |  |
|---|--|
| (1) Coulis de perforation.                        | (1) Bentonite-cement slurries.                 |
| (2) Boues de bentonite.                           | (2) Bentonite slurries.                        |
| (3) Filtration en cm <sup>3</sup> .               | (3) Filtration in cm <sup>3</sup> .            |
| (4) Temps en échelle « $\sqrt{\text{minutes}}$ ». | (4) Time scale in « $\sqrt{\text{minutes}}$ ». |

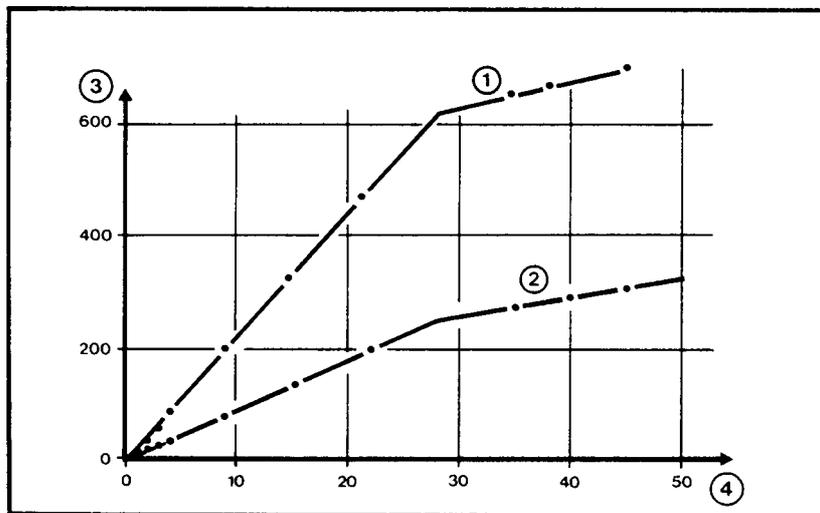


Fig. 8

Réduction de l'essorage (sous 50 kPa)  
*Reduction of filtration (under 50 kPa)*

- |  |  |
|--|--|
| (1) Témoin, coulis C/E = 0,1.                      | (1) Bound, grout C/W = 0.1.                    |
| (2) Coulis C/E = 0,1 avec réducteur de filtration. | (2) Grout C/W = 0.1 with filtration reducer.   |
| (3) Filtration en cm <sup>3</sup> .                | (3) Filtration in cm <sup>3</sup> .            |
| (4) Temps en échelle « $\sqrt{\text{minutes}}$ ».  | (4) Time scale in « $\sqrt{\text{minutes}}$ ». |

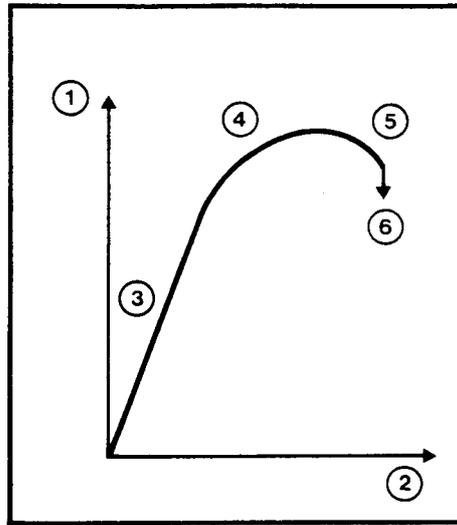


Fig. 9

Forme générale de la relation contrainte-déformation

*General form of the stress-strain relationship*

- |                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| (1) Contrainte.     | (1) Stress.       |
| (2) Déformation.    | (2) Strain.       |
| (3) Zone élastique. | (3) Elastic zone. |
| (4) Zone plastique. | (4) Plastic zone. |
| (5) Fluage.         | (5) Creep.        |
| (6) Rupture.        | (6) Failure.      |

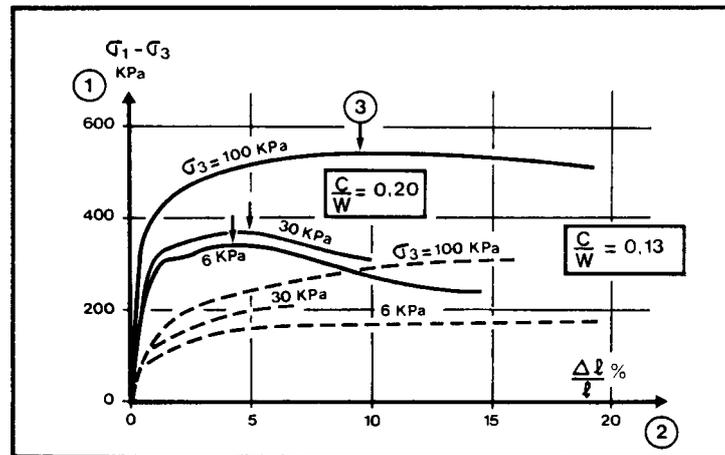


Fig. 10

Essais triaxiaux sur des bétons plastiques

*Triaxial tests on plastic concretes*

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| (1) Déviateur $\sigma_1 - \sigma_3$ . | (1) Deviator stress $\sigma_1 - \sigma_3$ . |
| (2) Déformation.                      | (2) Strain.                                 |
| (3) Rupture.                          | (3) Failure.                                |

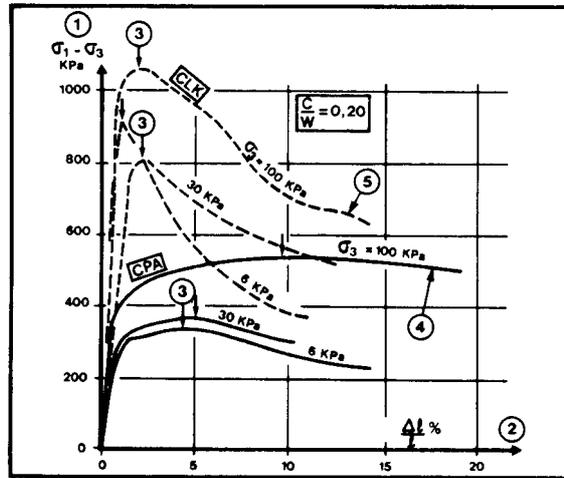


Fig. 11

Essais triaxiaux sur des bétons plastiques  
Influence de la nature du ciment et de l'étreinte  
*Triaxial tests on plastic concrete  
Influence of cement type and constraint*

- |   |   |
|---|---|
| (1) Déviateur $\sigma_1 - \sigma_3$ .             | (1) Deviator stress $\sigma_1 - \sigma_3$ . |
| (2) Déformation.                                  | (2) Strain.                                 |
| (3) Rupture.                                      | (3) Failure.                                |
| (4) Ciment type (P).                              | (4) (P) Type cement.                        |
| (5) Ciment type (BLF) avec 70 % de laitier (CLK). | (5) (BLF) Type cement with 70 % slag (CLK). |

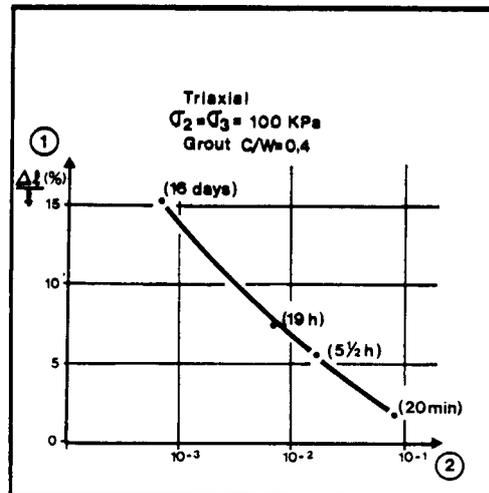


Fig. 12

Déformation à la rupture en fonction de la vitesse d'écrasement  
*Strain to rupture as a function of strain rate*

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| (1) Déformation.                       | (1) Strain.                         |
| (2) Vitesse en millimètres par minute. | (2) Rate in millimetres per minute. |

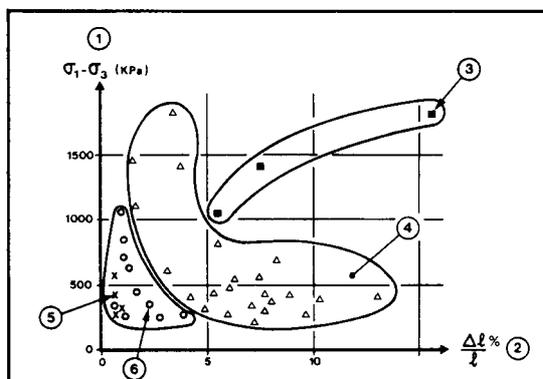


Fig. 13

Comparaisons entre coulis, mortiers et bétons  
*Comparisons between grouts, mortars and concretes*

- |  |  |
|--|--|
| (1) Déviateur de rupture en fonction de (2). | (1) Deviator stress at rupture as a function of (2). |
| (2) Déformation axiale.                      | (2) Axial strain.                                    |
| (3) Coulis essai lent.                       | (3) Slow tested grout.                               |
| (4) Coulis essai rapide.                     | (4) Fast tested grout.                               |
| (5) Bétons plastiques.                       | (5) Plastic concretes.                               |
| (6) Mortiers.                                | (6) Mortars.   |

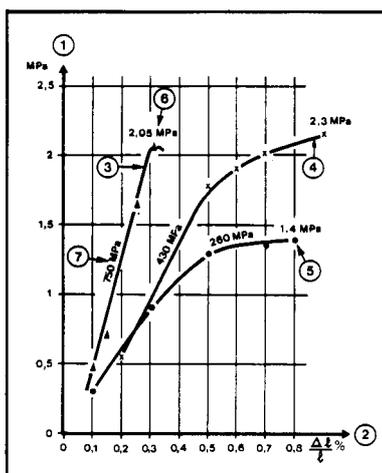


Fig. 14

Déformation à la rupture des conglomérats plastiques  
*Deformation to failure of plastic conglomerates*

- |   |  |
|---|--|
| (1) Résistance à la compression simple.                                     | (1) Strength in simple compression.                                      |
| (2) Déformation.  | (2) Strain.  |
| (3) Béton plastique C/E = 0,51.   | (3) Plastic concrete, C/W = 0.51.  |
| (4) Mortier plastique C/E = 0,25 avec 590 kg de filler par m <sup>3</sup> . | (4) Plastic mortar C/W = 0.25 with 590 kg of filler per m <sup>3</sup> . |
| (5) Coulis C/E = 0,25.  | (5) Grout C/W = 0.25.  |
| (6) Valeur de rupture correspondante.                                       | (6) Corresponding failure value.   |
| (7) Module correspondant dans la plage des déformations élastiques.         | (7) Corresponding modulus in the elastic strain zone.                    |

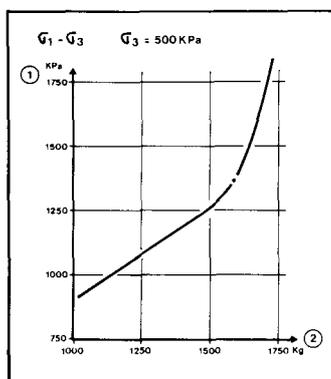


Fig. 15

Relation entre la résistance et la teneur en agrégats du béton dans l'essai triaxial

*Relationship between strength and aggregate content for concrete in triaxial testing*

(1) Déviateur  $\sigma_1 - \sigma_3$  sous  $\sigma_3 = 500$  kPa.

(1) Deviator stress  $\sigma_1 - \sigma_3$  with  $\sigma_3 = 500$  kPa.

(2) Teneur en agrégats par  $m^3$ .

(2) Aggregate content per  $m^3$ .

Le liant a la composition suivante :

The binder has the following composition :

- eau : 387 à 627 l;
- ciment (P) : 74 à 119 kg;
- bentonite : 0 à 52,5 kg.

- water : 387 to 675 l;
- cement (P) : 74 to 119 kg;
- bentonite : 0 to 52.5 kg.

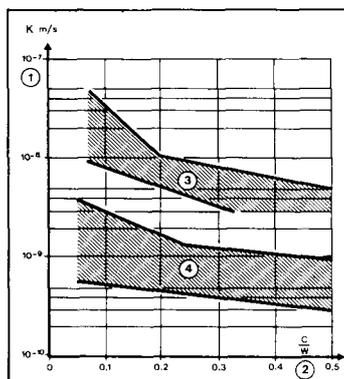


Fig. 16

Influence du rapport C/E et de la teneur en agent colloïdal sur la perméabilité des coulis bentonite-ciment

*Influence of C/W ratio and colloidal agent content on permeability of cement-bentonite grouts*

Essais à 28 jours.

Test at 28 days.

Échantillons de provenance :

Samples from :

- laboratoire;
- centrale;
- paroi avant rigidification.

- laboratory;
- production plant;
- diaphragm wall before set.

(1) Coefficient de perméabilité.

(1) Coefficient of permeability.

(2) Rapport C/E.

(2) C/W ratio.

(3) Dosage en bentonite 25 à 35  $kg/m^3$ .

(3) Bentonite at 25 to 35  $kg/m^3$ .

(4) Dosage en bentonite 45 à 65  $kg/m^3$ .

(4) Bentonite at 45 to 65  $kg/m^3$ .

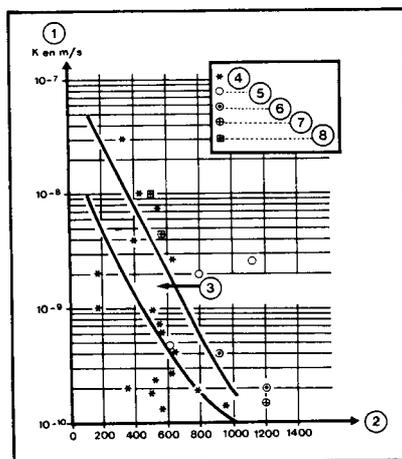


Fig. 17

Influence de charges diverses sur le coefficient de perméabilité des coulis base ciment

*Influence of various additions on the coefficient of permeability of basic cement grout*

- |   |  |
|---|--|
| (1) Coefficient de perméabilité.                  | (1) Coefficient of permeability.                   |
| (2) Teneur en matières sèches g/dm <sup>3</sup> . | (2) Dry matter content g/dm <sup>3</sup> .         |
| (3) Fuseau des coulis base ciment sans charge.    | (3) Band for basic cement grout without additions. |
| (4) Coulis avec CHF et sable.                     | (4) Grout with BLF and sand.                       |
| (5) Coulis avec CLK et filler.                    | (5) Grout with BLF and filler.                     |
| (6) Coulis avec CPAL et cendre.                   | (6) Grout with P.Co and ash.                       |
| (7) Coulis avec PMF2 et cendre.                   | (7) Grout with POZ and ash.                        |
| (8) Coulis avec CPA et cendre.                    | (8) Grout with P and ash.                          |

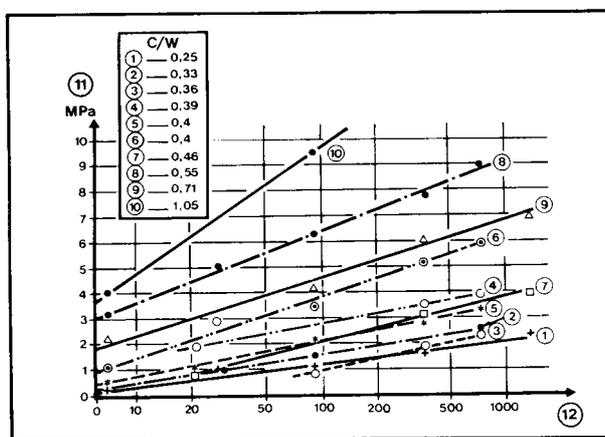


Fig. 18

Variation de la résistance à la compression dans le temps de mélanges plastiques

*Variation in compressive strength of plastic mixtures with time*

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| (1) à (10) Variation du rapport C/E.   | (1) to (10) Variation in C/W ratio. |
| (11) Résistance.                       | (11) Strength.                      |
| (12) Durée de vieillissement en jours. | (12) Age in days.                   |

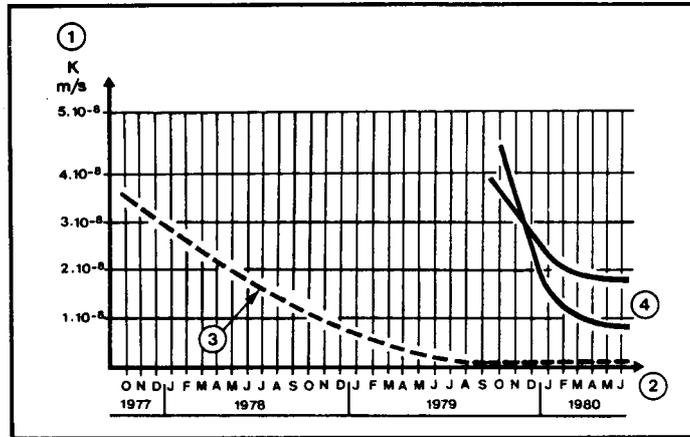


Fig. 19

Évolution de la perméabilité au cours du temps de 3 coulis

*Evolution of permeability with time for 3 grouts*

- |   |   |
|---|---|
| (1) Perméabilité K en m/s.                                    | (1) Permeability K in m/s.                                |
| (2) Temps en mois.  | (2) Time in months.                                       |
| (3) Coulis ciment CHF 45 (80 kg) et bentonite CV 15 (30 kg).  | (3) Grout with cement BLF (80 kg) and bentonite (30 kg).  |
| (4) Coulis ciment CHF 45 (100 kg) et bentonite FTP 3 (30 kg). | (4) Grout with cement BLF (100 kg) and bentonite (30 kg). |

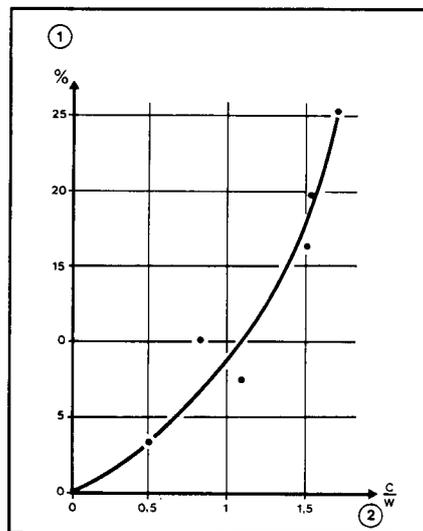


Fig. 20

Perte de résistance d'échantillons de coulis conservés en eau distillée, par rapport aux témoins conservés en moule hermétique, au bout d'un an.

*Loss of strength of grout samples stored in distilled water, with respect to control samples kept in a hermetic mould, after one year.*

- |                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| (1) Perte de résistance en %. | (1) Strength loss %.        |
| (2) Variation du rapport C/E. | (2) Variation in C/W ratio. |

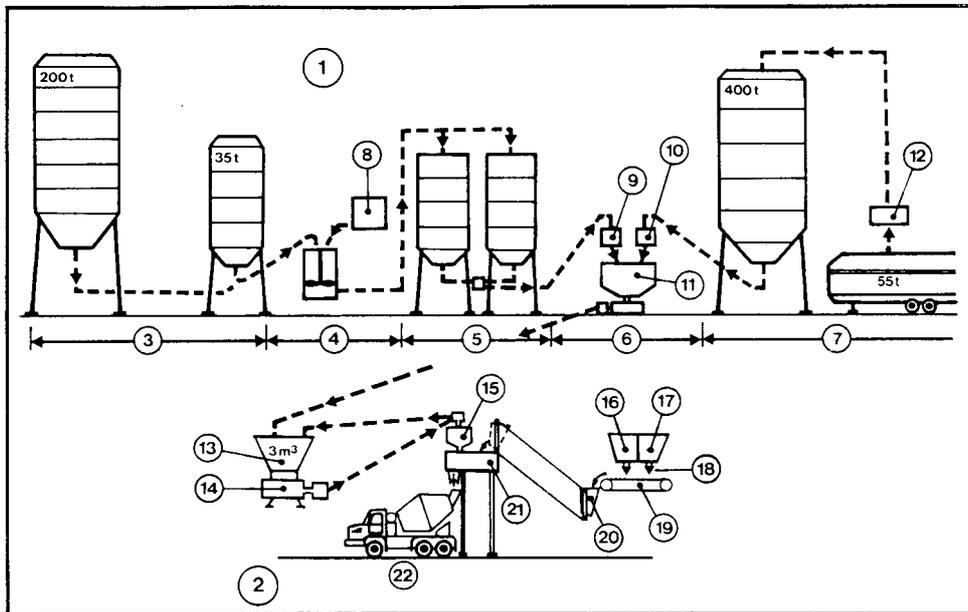


Fig. 21

Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale à conglomérats plastiques  
*Diagram of the working principle of a plastic conglomerate plant*

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| (1) Fabrication coulis.                     | (1) Grout production.                 |
| (2) Fabrication béton plastique.            | (2) Plastic concrete production.      |
| (3) Stockage argile en poudre ou bentonite. | (3) Clay powder or bentonite storage. |
| (4) Fabrication boue mère.                  | (4) Basic slurry production.          |
| (5) Stockage boue liquide.                  | (5) Liquid slurry storage.            |
| (6) Fabrication coulis.                     | (6) Grout production.                 |
| (7) Stockage ciment.                        | (7) Cement storage.                   |
| (8) Stock d'eau.                            | (8) Water supply.                     |
| (9) Cuve doseuse à volume automatique.      | (9) Automatic volume dosing hopper.   |
| (10) Balance à ciment.                      | (10) Cement weigher.                  |
| (11) Cuve de digesteur.                     | (11) Digester hopper.                 |
| (12) Compresseur.                           | (12) Compressor.                      |
| (13) Stockage coulis.                       | (13) Grout storage.                   |
| (14) Pompe.                                 | (14) Pump.                            |
| (15) Bascule à coulis.                      | (15) Grout weigher.                   |
| (16) Sable.                                 | (16) Sand.                            |
| (17) Gravier.                               | (17) Gravel.                          |
| (18) Vannes.                                | (18) Shut-off doors.                  |
| (19) Balance plus tapis roulant.            | (19) Conveyor belt scales.            |
| (20) Skip.                                  | (20) Skip.                            |
| (21) Malaxeur.                              | (21) Mixer.                           |
| (22) Toupie.                                | (22) Mixer truck.                     |

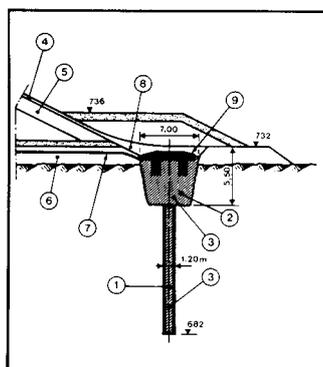


Fig. 22

Exemple de réalisation d'un dispositif de raccordement écran amont/masque

*Example of upstream cut off wall/facing bond*

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| (1) Paroi moulée béton plastique. | (1) Cast-in-place plastic concrete diaphragm wall. |
| (2) Massif de tête.               | (2) Head block.                                    |
| (3) Béton plastique.              | (3) Plastic concrete.                              |
| (4) Masque bitumineux.            | (4) Bituminous facing.                             |
| (5) Alluvions sélectionnées.      | (5) Selected alluvia.                              |
| (6) Matériau fin.                 | (6) Fine material.                                 |
| (7) Membrane étanche.             | (7) Watertight membrane.                           |
| (8) Binder.                       | (8) Binder.  |
| (9) Béton armé.                   | (9) Reinforced concrete.                           |

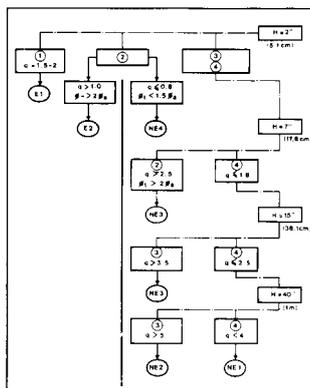


Fig. 23

Essai d'érodabilité des sols à grains fins. Méthode de J.-L. Sherard

*Erodability test for fine grained soils. J.-L. Sherard Method*

- |                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| (E) Érodable.           | (E) Erodable.        |
| (NE) Non érodable.      | (NE) Non erodable.   |
| (1) Opaque.             | (1) Opaque.          |
| (2) Trouble.            | (2) Cloudy.          |
| (3) Légèrement trouble. | (3) Slightly cloudy. |
| (4) Claire.             | (4) Clear.           |

H : Pression hydrostatique. H : Hydrostatic pressure.

q : Débit en cm<sup>3</sup>/s. q : Discharge in cm<sup>3</sup>/s.

Ø<sub>h</sub> : Diamètre du trou. Ø<sub>h</sub> : Hole diameter.

Ø<sub>a</sub> : Diamètre de l'aiguille. Ø<sub>a</sub> : Needle diameter.



Imprimerie de Montligeon  
61400 La Chapelle Montligeon  
Dépôt légal : mai 1985  
ISSN 0534-8293  
Couverture : L. Dronneau

**Copyright © ICOLD - CIGB**

*Archives informatisées en ligne*



*Computerized Archives on line*

*The General Secretary / Le Secrétaire Général :  
André Bergeret - 2004*



---

**International Commission on Large Dams  
Commission Internationale des Grands Barrages  
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**  
*<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>*