

EMBANKMENT DAMS ON PERMAFROST

A review of the russian experience

BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES CONSTRUITS SUR LE PERGÉLISOL

Examen de l'expérience russe

Bulletin 133



2007

Cover: Diavik Dam, in the North-West Territories (Canada)

Couverture : Barrage de Diavik, dans les Territoires nord-ouest du Canada

AVERTISSEMENT – EXONÉRATION DE RESPONSABILITÉ :

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

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

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

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

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

Original text in English
French translation by the Canadian Committee (J-P Tournier)
Layout by Nathalie Schauner

*Texte original en anglais
Traduction en français par le Comité Canadien (J-P Tournier)
Mise en page par Nathalie Schauner*

EMBANKMENT DAMS ON PERMAFROST

A review of the russian experience

BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES CONSTRUITS SUR LE PERGÉLISOL

Examen de l'expérience russe

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 53 75 16 52 - Fax : (33-1) 40 42 60 71
E-mail : secretaire.general@icold-cigb.org
Site : www.icold-cigb.net

COMMITTEE ON MATERIALS FOR FILL DAMS
COMITÉ DES MATÉRIAUX POUR BARRAGES EN REMBLAI

Chairman/Président

Colombia/Colombie

A. Marulanda

Vice-Chairman

Russia/Russie

V.G. Radchenko

Members/Membres

Australia/Australie

C. Bradbury

Austria/Autriche

P. Tschernutter

Brazil/Brésil

J. Pimenta de Avila

Bulgaria/Bulgarie

N.I. Dimitrov

Canada

J-P. Tournier

China/Chine

L. Nenghui

Finland/Finlande

Juha Laasonen

France

J-J. Fry

Germany/Allemagne

D. Godde

India/Inde

V.K. Kapur

Iran

N. Tarkech Douz

Italy/Italie

R. Jappelli

Japan/Japon

Yugi Kogo

Pakistan

Aurangzeb Khattak

Portugal

E. Maranha das Neves

South Africa/Afrique du Sud

H.F. Elges

Spain/Espagne

C. Olalla

Switzerland/Suisse

P. Brenner

United Kingdom/Royaume-Uni

R.C. Bridle

USA/États-Unis

D.E. Kleiner

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DES CONDITIONS NATURELLES DÉTERMINANT LA CONSTRUCTION ET L'EXPLOITATION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DANS LES ZONES CRYOLITIQUES
3. PRINCIPALES TENDANCES DANS LA CONCEPTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DES REGIONS DU NORD
4. TRAITEMENT DES FONDATIONS ET PASSAGE DES EAUX ET DES GLACES DETOURNÉES
5. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION
6. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE L'EXPLOITATION, DE LA RÉPARATION ET DE LA RESTAURATION DES BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES
7. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA CONSTRUCTION ET DE L'EXPLOITATION DES BARRAGES
8. RÉFÉRENCES

ANNEXES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. SPECIFIC FEATURES OF NATURAL CONDITIONS DETERMINING THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF HYDRAULIC STRUCTURES IN CRYOLITIC ZONES
3. MAIN TRENDS IN THE DESIGN OF HYDRAULIC STRUCTURES IN THE NORTHERN REGIONS
4. FOUNDATION TREATMENT AND PASSING OF DIVERSION FLOW AND ICE
5. SPECIFIC FEATURES OF CONSTRUCTION WORKS
6. SPECIFIC FEATURES OF OPERATION, REPAIR AND REHABILITATION OF EMBANKMENT DAMS
7. ENVIRONMENTAL IMPACTS OF DAM CONSTRUCTION AND OPERATION
8. REFERENCES

ANNEXES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	12
1. INTRODUCTION	14
2. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DES CONDITIONS NATURELLES DÉTERMINANT LA CONSTRUCTION ET L'EXPLOITATION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DANS LES ZONES CRYOLITIQUES	16
2.1. Climat	16
2.2. Caractéristiques générales des conditions techniques et géologiques ..	18
2.3. Régime hydrologique des cours d'eau du Nord	18
3. PRINCIPALES TENDANCES DANS LA CONCEPTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DES RÉGIONS DU NORD	24
3.1. Principales solutions pour la conception et l'implantation	24
3.2. Projets hydroélectriques avec des barrages en matériaux meubles	26
3.3. Conception de l'équipement frigorifique pour le bouclier de glace	42
3.4. Influence des conditions géocryologiques sur la conception et l'implantation	46
4. TRAITEMENT DES FONDATIONS ET PASSAGE DES EAUX ET DES GLACES DETOURNÉES	58
4.1. Traitement des fondations	58
4.2. Tendances modernes pour le passage de l'écoulement détourné pendant la construction	64
4.3. Écoulement des glaces par des ouvrages temporaires et permanents .	68
5. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION	70
5.1. Exigences relatives à l'angle des pentes et aux dimensions des bermes	70
5.2. Travaux de dynamitage	72
5.3. Mise en place des matériaux terreux	74
6. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE L'EXPLOITATION, DE LA RÉPARATION ET DE LA RESTAURATION DES BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES	78
6.1. Barrages en matériaux meubles de type gelé	78

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	13
1. INTRODUCTION	15
2. SPECIFIC FEATURES OF NATURAL CONDITIONS DETERMINING THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF HYDRAULIC STRUCTURES IN CRYOLITIC ZONES	17
2.1. Climate.....	17
2.2. General characteristics of engineering-geological conditions	19
2.3. Hydrological regime of Northern rivers	19
3. MAIN TRENDS IN THE DESIGN OF HYDRAULIC STRUCTURES IN THE NORTHERN REGIONS	25
3.1. Main design and layout solutions	25
3.2. Hydro power projects with embankment dams	27
3.3. Design of refrigerating equipment for frozen shields	43
3.4. Influence of geocryological conditions on the design and layout solutions	47
4. FOUNDATION TREATMENT AND PASSING OF DIVERSION FLOW AND ICE	59
4.1. Foundation treatment	59
4.2. Modern trends in passing the diversion flow during construction.....	65
4.3. Ice discharge through temporary and permanent structures	69
5. SPECIFIC FEATURES OF CONSTRUCTION WORKS	71
5.1. Requirements to the slope angle and the berm dimensions	71
5.2. Blasting works	73
5.3. Placement of ground materials	75
6. SPECIFIC FEATURES OF OPERATION, REPAIR AND REHABILITATION OF EMBANKMENT DAMS	79
6.1. Embankment Dams of the Frozen Type	79

6.1.1. Barrage de la centrale thermoélectrique d'Anadir	78
6.1.2. Barrage d'Irelyakhskaïa	86
6.1.3. Barrage de la rivière Myaundja	90
6.1.4. Barrage de la rivière Taatta	94
6.1.5. Barrage du ruisseau Pevek	96
6.1.6. Barrage de la rivière Dolgaya	98
6.1.7. Barrage de la rivière Glukhar	100
6.1.8. Barrage de la rivière Sytykan	100
6.2. Barrages en matériaux meubles de type dégelé	106
6.2.1. Barrage de Kadyktchanskaïa	106
6.2.2. Barrage de Kureiskaïa	108
6.2.3. Barrage de la rivière Pravaya Magdagacha	110
7. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA CONSTRUCTION ET DE L'EXPLOITATION DES BARRAGES	112
8. RÉFÉRENCES	118
ANNEXES A LISTE DES BARRAGES MENTIONNÉS DANS CE BULLETIN	122
ANNEXES B LES FIGURES ET LEURS LÉGENDES	132

6.1.1. Dam of Anadir thermoelectric power plant	79
6.1.2. Irelyakhskaya Dam	87
6.1.3. Dam on Myaundzha River	91
6.1.4. Dam on Taatta River	95
6.1.5. Dam on Pevek Brook	97
6.1.6. Dam on Dolgaya River	99
6.1.7. Dam on Glukhar River	101
6.1.8. Dam on Sytykan River	101
6.2. Embankment dams of the thawed type	107
6.2.1. Kadykchanskaya Dam	107
6.2.2. Kureiskaya Dam	109
6.2.3. Dam on Pravaya Magdagacha River	111
7. ENVIRONMENTAL IMPACTS OF DAM CONSTRUCTION AND OPERATION.....	113
8. REFERENCES.....	118
ANNEXES A LIST OF DAMS MENTIONED IN THIS BULLETIN	123
ANNEXES B CAPTIONS TO FIGURES AND FIGURES	132

LISTES DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1. Année hydrologique des plus grands cours d'eau du nord de la Russie	20
Tableau 2. Débits maximal et minimal sur le site des barrages	20
Tableau A-1. Liste des barrages mentionnés dans ce Bulletin	122

FIGURES

Fig. 1. Carte de répartition des sols gelés en permanence et de façon saisonnière (selon K. Kondratiyeva)	132
Fig. 2. Types de barrages en matériaux meubles construits dans les zones climatiques du Nord	133
Fig. 3. Barrage de la CH de Viluiskaïa	134
Fig. 4. Barrage de la CH de Kolymskaïa	136
Fig. 5. Courbes de limites granulométriques des matériaux terreux mis en place dans le barrage de la CH de Kolymskaïa	138
Fig. 6. Plan de la crête du barrage	140
Fig. 7. Température du noyau du barrage de la CH de Kolymskaïa	142
Fig. 8. Modèles de systèmes frigorifiques	144
Fig. 9. Répartition des températures dans le corps et les fondations du barrage	146
Fig. 10. Barrage de résidus miniers de deux types de construction	148
Fig. 11. Barrage de la CH d'Ust-Khantaiskaïa	150
Fig. 12. Barrage de la CH de Kureiskaïa	152
Fig. 13. Barrage d'Anadyrskaiïa	153
Fig. 14. Caractéristiques dynamiques de la température dans le corps et les fondations, sur l'axe du barrage d'Anadyrskaiïa	154
Fig. 15. Barrage du réservoir permanent sur la rivière Irelyakh	156
Fig. 16. Barrage de la rivière Myaundja	158
Fig. 17. Barrage du ruisseau Pevek	160
Fig. 18. Barrage de la rivière Dolgaya	162
Fig. 19. Barrage de la rivière Sytykan	163
Fig. 20. Barrage du ruisseau Kadykchan	164
Fig. 21. Barrage de la rivière Pravaya Magdagacha	165

LISTE OF TABLES AND FIGURES

TABLES

Table 1. Runoff of the greatest northern rivers of Russia	20
Table 2. Maximum and minimum flows at damsites.....	20
Table A.1. List of dams mentionned in this Bulletin	123

FIGURES

Fig. 1. Perennially and seasonally frozen ground distribution map (according to K. Kondratiyeva)	132
Fig. 2. Types of fill dams constructed in the northern climatic zones	133
Fig. 3. Dam of Viluiskaya HPP	134
Fig. 4. Dam of Kolymenskaya HPP	136
Fig. 5. Grain size distribution boundary curves for soils placed into Kolymenskaya HPP Dam	138
Fig. 6. Design of dam crest portion	140
Fig. 7. Temperature of dam core of Kolymenskaya HPP	142
Fig. 8. Design of refrigerating systems	144
Fig. 9. Temperature distribution in dam body and foundation	146
Fig. 10. Tailings dam constructed by using two types of construction	148
Fig. 11. Dam of Ust-Khantaiskaya HPP	150
Fig. 12. Dam of Kureiskaya HPP	152
Fig. 13. Anadyrskaya Dam	153
Fig. 14. Temperature dynamics in the body and foundation on dam axis of Anadyrskaya Dam	154
Fig. 15. Dam of permanent reservoir on Irelyakh River	156
Fig. 16. Dam on Myaundzha River	158
Fig. 17. Dam on Pevek Creek	160
Fig. 18. Dam on Dolgaya River	162
Fig. 19. Dam on Sytykan River	163
Fig. 20. Dam on Kadykchan Creek	164
Fig. 21. Dam on Pravaya Magdagacha River	165

ANNEXES

A	Liste des barrages mentionnés dans ce Bulletin	122
	<i>List of dams mentioned in this Bulletin</i>	123
B	Les figures et leurs légendes	132
	<i>Captions to figures and figures</i>	132

AVANT-PROPOS

Les zones où se trouve le pergélisol (les zones cryolitiques) sont caractérisées par un climat rigoureux et des conditions topographiques, géologiques et hydrogéologiques complexes. Pendant la construction d'ouvrages hydrauliques dans ces zones, nous sommes confrontés à un certain nombre de problèmes spécifiques qu'on ne retrouve que dans celles-ci. Pour cette raison, il convient de présenter un aperçu des caractéristiques structurales et des techniques d'ingénierie utilisées pour exploiter et réparer les barrages construits dans des zones cryolitiques, fondées sur l'expérience acquise au cours des travaux d'exploration, ainsi que pendant la conception, la construction et l'exploitation de ces installations.

Le présent Bulletin est destiné aux ingénieurs-géologues, ainsi qu'aux concepteurs et constructeurs d'ouvrages hydrauliques.

À la demande du Comité National Russe, cette première version a été compilée et préparée à l'Institut de génie hydraulique B. E. Vedeneev (VNIIG) par un groupe de travail formé par A. A. Kagan, N. F. Krivonogova et V. G. Radchenko, sous la direction d'E. N. Bellendir.

Le Comité National Canadien a apporté une contribution majeure à la réalisation de l'édition anglaise de ce bulletin. Il convient de souligner en premier lieu l'apport de M. G. S. Larocque, qui n'a pas ménagé ses efforts pour améliorer cette édition. Nous tenons également à remercier d'autres membres du Comité des matériaux pour barrages en remblai, notamment R. C. Bridle, D. Kleiner, R. Jappelli, A. Leskela et J. P. Tournier, pour leur aide et leurs commentaires.

A. MARULANDA

Président,

Comité des matériaux pour barrages en remblai

FOREWORD

Zones where permafrost is found (cryolitic zones) are characterized by a rigorous climate and complicated topographic, geological and hydrogeological conditions. During the construction of hydraulic structures in those zones, we are faced with a number of specific problems, not existing outside these zones. Therefore, it is reasonable to give an insight into the structural features and the engineering characterizing the operation and repair of dams built in cryolitic zones, on the basis of exploration, design, construction and operation experience.

The present Bulletin is intended for geological engineers, designers and builders of hydraulic engineering structures.

On behalf of the Russian National Committee, the current initial version has been compiled and prepared in the B.E. Vedeneev VNIIG under the leadership of E.N. Bellendir by a working group (A.A. Kagan, N.F. Krivonogova and V.G. Radchenko).

The Canadian National Committee has much contributed to the edition of this Bulletin. This primarily refers to Mr. G.S. Larocque who undertook enormous efforts for the improvement of the English text of the Bulletin. Other members of the Committee on Materials for Fill Dams, especially R.C. Bridle, D. Kleiner, R. Jappelli, A. Leskela and J.P. Tournier, provided assistance and feedback. They deserve our greatest appreciation.

A. MARULANDA
Chairman,
Committee on Materials for Fill Dams

1. INTRODUCTION

L'exploitation de centrales hydroélectriques construites dans les régions nordiques polaires s'est avérée très profitable, car elle a su mettre à profit les cours d'eau profonds, les conditions techniques et géologiques relativement favorables et les terres inondées à faible valeur agricole.

À cause des conditions naturelles particulières et de l'absence de réseaux de transport développés reliés à des régions industrielles, on préfère construire les barrages avec des matériaux meubles disponibles sur place. Pour la construction de ces barrages, on utilise divers matériaux extraits du sol, disposés selon une coupe-type homogène ou non homogène, pour former la partie imperméable du barrage.

Le principal type de barrages en matériaux meubles, spécialement dans les cas de barrages les plus élevés, est celui des barrages en terre et en enrochement à noyau central parfois incliné, pourvus d'un réseau de drainage efficace du massif de recharge aval, afin d'améliorer la stabilité structurale et de prévenir la pénétration du gel et de l'englacement à l'intérieur du barrage.

En outre, les barrages en enrochement, qui comportent des dispositifs imperméables en acier, en béton bitumineux ou en matières polymériques, sont également prometteurs.

De plus, il est possible de bâtir un noyau imperméable en injectant du gravier grossier avec un liant à base d'argile-ciment ou d'argile.

Ce document présente une analyse des conditions naturelles dans des zones cryolitiques de la Russie, les caractéristiques spéciales de l'implantation, du type et de la structure des barrages en matériaux meubles, ainsi que celles de la glace et de l'eau déversées par les ouvrages d'évacuation et, enfin, les paramètres spéciaux des technologies des barrages en matériaux meubles. On présente aussi des cas types de déformation, de réparation et de reconstruction de barrages, ainsi que des exemples de leur exploitation dans un climat rigoureux.

1. INTRODUCTION

The operation of hydropower plants built in the regions of the Polar North proved highly efficient. The possibility to build highly efficient hydropower stations is provided by deep-water rivers, relatively favourable engineering-geological conditions and a low agricultural value of the flooded areas.

The specific natural conditions and the lack of developed transport connections with industrial regions give preference to dam construction using local materials. Embankment dams are built with soils using an homogeneous or non homogeneous type of design and various materials as the impervious part of the dam.

The main type of embankment dams, especially high dams, is earth and rockfill with a central core and sometimes an inclined core, and an effective drainage of the downstream shell to improve structural stability and prevent frost penetration and icing inside the dam.

Rockfill dams with impervious elements of steel, asphalt concrete and polymer materials are also promising.

It is possible to make an impervious core by grouting a coarse gravel soil with a clay-cement or a clay binder.

The current paper presents the analysis of natural conditions in cryolitic zones of Russia, the special features of the layout, type and structure of fill dams, the ice and water discharged through the spilling structures and the special parameters of fill dam technology. Typical examples are given of dam deformation, repair and reconstruction, as well as operation in a severe climate.

2. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DES CONDITIONS NATURELLES DÉTERMINANT LA CONSTRUCTION ET L'EXPLOITATION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DANS LES ZONES CRYOLITIQUES

2.1. CLIMAT

Les régions de pergélisol (zones cryolitiques) occupent plus de 25 % de la superficie totale des terres de la planète et 65 % du territoire de la Russie (Fig. 1).

Le climat de ces régions, de type continental, est assez rigoureux, avec ses longs hivers froids, ses étés courts et ses printemps et automnes relativement brefs. La durée de la période sans gel, d'une centaine de jours dans le Sud, est beaucoup plus courte dans le Grand Nord.

La température minimale de l'air en hiver peut descendre à -60°C , et même plus bas.

La température moyenne de l'air pérenne dans les régions très froides de la Yakoutie et de Magadan est comprise entre -15 et -16°C et, sur le site de la centrale hydroélectrique (CH) d'Adytchanskaïa en cours de conception, elle est de $-12,2^{\circ}\text{C}$. La durée de la période de gel est de 240 jours sur le site de la CH de Kureiskaïa, de 283 jours sur le site de la CH de Kolymaskaïa, et de 305 jours sur le site de la CH d'Adytchanskaïa [15, 22, 25].

Les hivers longs et rigoureux accompagnés de vents forts et fréquents et de basses températures sont caractéristiques des cours inférieurs des rivières Lena, Iana et Indigirka, ainsi que des fleuves Anadyr et Ienisseï, dont la température annuelle moyenne est d'environ -10°C .

Les régions continentales sont caractérisées par une forte variation annuelle de la température, qui peut atteindre 95°C . L'hiver dure plus de huit mois, et la température quotidienne moyenne ne dépasse le zéro qu'au début de juin.

D'épais brouillards recouvrent habituellement les terres pendant la plupart des mois de grand froid, ce qui empêche les opérations à l'extérieur pendant environ 60 jours par année. Dans les régions côtières, vers la fin de la nuit polaire, il y a une période de grands vents (soufflant à plus de 12 m/s), de tempêtes de neige et de précipitations de neige, suivie par un été court et pluvieux.

Les conditions climatiques de l'est de la Sibérie, notamment des régions de la Yakoutie, de Magadan et de Tchoukotka (région de centrales hydroélectriques existantes et prévues) sont particulièrement rigoureuses, avec des températures moyennes pour le mois le plus froid de -50°C à Oimiakon et de $-48,9^{\circ}\text{C}$ à Verkhoyansk, et une température minimale absolue de -71°C en Yakoutie. Il y a des périodes de gel, même pendant le bref été [5, 15, 25].

2. SPECIFIC FEATURES OF NATURAL CONDITIONS DETERMINING THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF HYDRAULIC STRUCTURES IN CRYOLITIC ZONES

2.1. CLIMATE

The regions with permafrost (cryolitic zones) occupy over 25 % of the total land area on the earth and 65 % of the territory of Russia (Fig. 1).

The climate of these regions is rather severe, of the continental type, with long cold winters, short summers and rather short springs and autumns. The duration of a period without frost varies from 100 days in the south to several days in the Far North.

The minimum winter air temperature can reach -60°C and even fall below this mark.

The average perennial air temperature in the coldest regions of Yakutiya and Magadan is -15°C to -16°C and, at the site of Adichanskaya HPP under design it is -12.2°C . The duration of the frost period is 240 days at the site of Kurejskaya HPP, 283 days at the site of Kolymuskaya HPP and 305 days at the site of Adychanskaya HPP [15, 22, 25].

Severe long winters with frequent strong winds and low temperatures are characteristic for the downstream portions of Anadyr, Lena, Yana, Indigirka and Eyenisey Rivers, where the average annual temperature is about -10°C .

Continental regions are characterized with a high temperature variation within a year reaching 95°C . The winter period is more than 8 months long, the daily average temperature rising above zero only in the beginning of June.

Fogs are typical for most cold months, making outdoor operations impossible for about 60 days per year. With the end of the polar nights season in the coastal area, there is a period of strong winds (over 12 m/s), snow storms and snow falls which is followed by a short rainy summer.

The climatic conditions of East Siberia including Yakutiya, Magadan and Chukotka regions (regions of existing and projected hydropower plants) are especially severe: the average temperature of the coldest month in Oimyakon is -50°C , Verkhoyansk -48.9°C and the absolute minimum temperature in Yakutia is -71°C . Frost occurrence is typical even during the short summers [5, 15, 25].

2.2. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES CONDITIONS TECHNIQUES ET GÉOLOGIQUES

Les conditions techniques et géologiques des ouvrages hydroélectriques dans les zones cryolitiques sont souvent complexes, voire même excessivement complexes, à cause de caractéristiques spéciales liées à la structure géologique et géomorphologique des vallées et du développement du pergélisol. Les vallées fluviales sont de type montagnard avec un profil de gorge ou de ravin dans les parties amont et médiane du cours d'eau, ou de type plaine en aval, avec un profil de vaste plateau et de vaste plaine inondable [4, 5, 27].

Les fondations géologiques sont formées de roches de l'archéen et du protérozoïque au quaternaire.

On trouve un ensemble favorable de conditions techniques et géologiques dans les parties des vallées qui se sont développées dans des massifs rocheux d'origine magmatique, métamorphique et sédimentaire, qui sont recouvertes d'une mince couverture de mort-terrain du quaternaire (centrales hydroélectriques de Viluiskaïa I-II, de Kolimskaïa, d'Ust-Srednekanskaïa et de Mokskaïa).

Les conditions dans les vallées où il y a une épaisseur significative de sols à grains grossiers [projets de centrales hydroélectriques de Viluiskaïa III, de Touroukhanskaïa, de Khantaïskaïa, ainsi que du projet de centrale thermique (CT) d'Anadyrkaïa] sont plus complexes [12, 27].

Les zones de pergélisol, qui peuvent être de type continu, en grande partie continu, discontinu, insulaire et massif ou insulaire et dispersé, s'étendent dans les zones cryolitiques de la Russie. Le type de zone change du nord au sud (Fig. 1).

L'épaisseur et la température de pergélisol varient selon les conditions climatiques, géologico-tectoniques et géomorphologiques. L'épaisseur du pergélisol, comprise entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres près de la limite sud, peut atteindre 700 m, voire même 1 400 m en Sibérie centrale et dans les montagnes.

La couche supérieure de pergélisol fond pendant la période chaude de l'année. L'épaisseur de la couche dégelée est comprise entre 0,2 et 7 m, selon l'importance des facteurs ci-dessus, l'exposition des pentes, ainsi que le type et l'épaisseur du sol et de la couverture végétale.

2.3. RÉGIME HYDROLOGIQUE DES COURS D'EAU DU NORD

Il y a de grands réseaux fluviaux à fort potentiel hydroélectrique dans les régions du nord de la Russie. Le Tableau 1 montre l'écoulement des plus grands cours d'eau du Nord. Leur module d'écoulement est compris entre 10 et 30 l/s par mètre carré [15, 22, 25].

À cause des neiges et des pluies, l'écoulement d'hiver des cours d'eau correspond à 2 à 3 % de l'année hydrologique, contre 97 à 98 % pour celui du printemps et de l'été. La période de faible écoulement d'hiver est suivie par de forts pics d'inondation au printemps et pendant la période de l'été et de l'automne. Les

2.2. GENERAL CHARACTERISTICS OF ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS

Engineering and geological conditions of hydropower construction in cryolitic zones vary widely from complicated to excessively complicated due to special features linked with the geological and geomorphological structure of valleys and the development of permafrost. The river valleys are either of the mountain type with a canyon/ravine profile in the upstream and the middle stream portions or the plain type in the downstream with a wide tray-shaped profile and wide floodplains [4, 5, 27].

The geological foundation is composed of rocks from archaic and proterozoic to quaternary eras.

The most favorable engineering and geological conditions are found in those parts of the valleys which are developed in rock masses of magmatic, metamorphic and sedimentary origin with a thin quaternary overburden cover (Viljuiskaya HPP I-II, Kolimskaya HPP, Ust-Srednekanskaya HPP, Mokskaya HPP).

The conditions in the valleys where there is a significant thickness of coarse-grained soils (Vilyujskaya HPP III, Turukhanskaya HPP, Khantajskaya HPP and Anadyrskaya TPP projects) are more complicated [12, 27].

There are continuous, predominantly continuous, discontinuous, massive insular, insular and rare insular zones of permafrost spreading in the cryolitic zones of Russia. The type of zones changes from north to south (Fig. 1).

The thickness and temperature of permafrost vary with climatic, geological-tectonic and geomorphological conditions. The permafrost thickness may vary from a few meters to tens of meters near the southern boundary to 700 and even 1 400 m in Central Siberia and the mountains.

The upper layer of permafrost thaws during the warm period of the year. The thickness of the thawed layer can vary from 0.2 m to 7 m depending on the above mentioned factors, the exposure of slopes and the type and thickness of soil and vegetation cover.

2.3. HYDROLOGICAL REGIME OF NORTHERN RIVERS

There are large river systems of significant power capacity in the northern regions of Russia. The runoff of the greatest rivers of the North is shown in Table 1. The rivers are characterized by a runoff modulus between 10 and 30 l/s per sq.km [15, 22, 25].

Due to the snow-rain supply, the discharge of the rivers in the winter period amounts to 2-3 % of the annual runoff while the relevant spring and summer discharge is 97-98 % of the annual runoff. A low flow in winter is followed by high flood peaks in the spring and summer-autumn. Heavy flows in the spring are

forts écoulements du printemps sont caractérisés par des épisodes d'embâcles, de hausse du niveau d'eau et de formation de glaces épaisses et robustes.

La direction méridienne du sud vers le nord de l'écoulement des cours d'eau, typique de la plupart des cours d'eau du Nord, a une forte influence sur leur régime hydrologique. En effet, parce que la débâcle commence dans leurs biefs d'amont, dans le Sud, l'année hydrologique est très variable d'une année à l'autre (Tableau 1).

Le Tableau 2 montre les écoulements maximaux et minimaux pour certains cours d'eau sur le site des barrages. Certaines années, ceux-ci peuvent geler complètement et pendant cette période, leur écoulement est réduit à zéro. Par exemple, l'écoulement des rivières Aditcha, Indygirka et Olenyok, ainsi que du fleuve Iana (qui ne figurent pas tous dans les tableaux) cesse complètement de janvier à avril [5, 15, 27].

Tableau 1
Année hydrologique des plus grands cours d'eau du nord de la Russie

Cours d'eau	Répartition de l'année hydrologique, %		
	<i>Printemps (V-VI)</i>	<i>Été - automne (VII-IX)</i>	<i>Hiver (XI-IV)</i>
Aldan	47,8	47,0	5,2
Vilyj	66,4	31,9	1,7
Indygirka	36,0	63,0	1,0
Kolyma	48,2	50,0	1,8
Lena	40,3	53,3	6,4
Olekma	40,3	53,3	6,4
Iana	33,9	65,8	0,3

Tableau 2
Débîts maximal et minimal sur le site des barrages

Cours d'eau	Site	Probabilité d'écoulement de 5 %, m ³ /s	
	Partie asiatique de la Russie	<i>Maximal (été)</i>	<i>Minimal (hiver)</i>
Vilyj	CH de Viluiskaïa I-II	12 600	0,29
Zeya	CH de Zeiskaïa	14 600	7,0
Kolyma	CH de Kolymskaïa	9 650	0,3
Kolyma	CH de Ust-Srednekanskaïa	11 000	0,3
Mamakan	CH de Mamakanskaïa	4 000	15,0
Khantaïka	CH de Ust-Khantajskaïa	8 090	12,0

Les crues de la période printemps-été sont impétueuses : pendant cette période, le volume de l'écoulement peut constituer de 31 (rivière Vitim) à 66 % (rivière

characterized by ice jams, water rise and thick and strong ice.

A meridian direction of the river flow is typical to the major part of the rivers in the North. This fact greatly affects their hydrologic regime. Ice breaking in these rivers starts from the upper reaches in the southern regions ; therefore the annual runoff is strongly variable within the year (Table 1).

The maximum and minimum discharges at damsites along some rivers are given in Table 2. The rivers can freeze down to the bottom in some years without any flow during the period. For example, the runoff of the rivers Adicha, Indygirka, Olenyok and Yana (not all shown in the tables) is equal to zero from January to April [5, 15, 27].

Table 1
Runoff of the greatest northern rivers of Russia

River	Distribution of the annual runoff, %		
	Spring (V-VI)	Summer - autumn (VII-IX)	Winter (XI-IV)
Aldan	47.8	47.0	5.2
Viluj	66.4	31.9	1.7
Indygirka	36.0	63.0	1.0
Kolyma	48.2	50.0	1.8
Lena	40.3	53.3	6.4
Olekma	40.3	53.3	6.4
Yana	33.9	65.8	0.3

Tableau 2
Maximum and minimum flows at damsites

River	Damsite	Flow probability of 5 %, m ³ /s	
	Asian part of Russia	Maximum (summer)	Minimal (winter)
Viluj	Vilujskaya I-II HPP	12 600	0.29
Zeya	Zeyskaya HPP	14 600	7.0
Kolyma	Kolymskaya HPP	9 650	0.3
Kolyma	Ust-Srednekanskaya HPP	11 000	0.3
Mamakan	Mamakanskaya HPP	4 000	15.0
Khantajka	Ust-Khantajskaya HPP	8 090	12.0

The spring-summer floods are very stormy: the runoff volume for this period may constitute between 31 % (Vitim river) and 66 % (Viluj river) of the annual

Vilyi) de l'année hydrologique. Dans le cas des petites rivières, le volume de la crue printanière, qui dure entre 40 et 60 jours, peut représenter environ 78 % de l'année hydrologique.

La débâcle commence dans les biefs supérieurs et crée des embâcles accompagnés de forts niveaux d'eau. Au cours de la période de l'automne et de l'hiver, on observe une forte dérive de frasil recouvrant jusqu'à 90 % de la section transversale des rivières.

Sur toutes les rivières, on observe des hummocks et la formation de glaces très épaisses et très robustes.

La période de l'été et de l'automne est souvent accompagnée de nombreuses hausses du niveau d'eau causées par des inondations pluviales, qui nuisent aux conditions d'exploitation dans la vallée fluviale [5, 15, 22, 25, 27].

runoff. For some smaller rivers, the volume of the spring flood is about 78 % of the annual runoff and the duration is between 40 and 60 days.

The ice break starts in the upper reaches and leads to ice jams accompanied by high water levels. In the autumn-winter period, intensive frazil ice drift is observed covering up to 90 % of the cross section.

All rivers are characterized by hammocks and the formation of ice of considerable thickness and strength.

The summer-autumn period is often accompanied by multiple raises of water level caused by rain floods deteriorating the operation conditions in the river valley [5, 15, 22, 25, 27].

3. PRINCIPALES TENDANCES DANS LA CONCEPTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DES RÉGIONS DU NORD

3.1. PRINCIPALES SOLUTIONS POUR LA CONCEPTION ET L'IMPLANTATION

Les exigences particulières relatives à la composition, au type et à la capacité des ouvrages sont déterminées par l'ensemble des conditions climatiques, hydrologiques, topologiques et géologiques au cours de la construction, par le facteur coût-efficacité et par les conditions sociales propres aux régions examinées.

Les barrages en matériaux meubles satisfont à la plupart des exigences relatives aux ouvrages construits dans des zones cryolitiques, par exemple en ce qui a trait à la quantité minimale de matières à transporter sur place et à la qualité des fondations, étant donné que ces exigences sont moins strictes que celles qui visent les barrages à fondations de béton. De plus, la construction de ces barrages fait appel à des technologies plus faciles à mettre en œuvre dans des conditions hivernales.

L'implantation de barrages en matériaux meubles doit créer des conditions sécuritaires :

1. pour l'écoulement de l'eau pendant la construction et l'exploitation, par des tunnels, des canaux, des canalisations ou des déversoirs ouverts, à un seul ou à plusieurs niveaux, ou
2. pour le passage des eaux par-dessus le corps du barrage, grâce à des dissipateurs d'énergie spéciaux, sans qu'il soit nécessaire de construire d'autres ouvrages spéciaux, ou par de déversoirs conçus pour les faibles niveaux d'eau.

Les centrales hydroélectriques peuvent être construites à la surface, ou être à moitié ou complètement enfouies.

Le profil non uniforme de l'année hydrologique propre aux cours d'eau du Nord est la principale caractéristique pour la sélection du type de barrage.

À cause des grandes distances, il faut réduire au minimum le volet du transport sur place, surtout dans le cas des barrages, dont la construction nécessite d'immenses quantités de matériaux.

Le choix du modèle structural et technologique du barrage est une question complexe du fait que les fondations reposent sur le pergélisol, qui peut fondre pendant l'exploitation en l'absence de mesures spéciales pendant la construction ou l'exploitation, ou (ce qui est plus probable), du fait de la présence de pergélisol dans les culées ou de sol dégelé sous le lit du cours d'eau [12].

Tous les facteurs mentionnés ci-dessus influencent le choix du type d'ouvrage et des techniques de construction.

3. MAIN TRENDS IN THE DESIGN OF HYDRAULIC STRUCTURES IN THE NORTHERN REGIONS

3.1. MAIN DESIGN AND LAYOUT SOLUTIONS

Special requirements concerning the composition, the type and the capacity of structures are determined by the set of climatic, hydrological, topological, geological conditions of the construction, cost effectiveness and social conditions typical to the regions under consideration.

Embankment dams meet most requirements for the structures built in cryolitic zones, such as the minimum amount of materials to be transported from elsewhere, less stringent requirements for foundation quality than those imposed on concrete dam foundations and a better adaptability of the construction process to the winter conditions.

The layout of embankment dams shall provide:

1. water discharge during construction and operation through single-level or multiple level tunnels, channels, pipes or open spillways, or
2. spilling over the dam body with special energy dissipators allowing no other special structures to be constructed or with spillways designed for low water levels of the river.

The hydropower plant structures can be located above the ground, semi-underground or underground.

The non-uniform pattern of the annual runoff typical to the northern rivers is the main feature responsible for the selection of the dam type.

Large transportation distances require the minimization of materials to be delivered, especially when building structures requesting so large volumes of materials as dams.

The choice of the dam structural design and technology is complicated by the fact that the foundation ground is permafrost which might thaw during the operation if no special measures are taken either during the construction or the operation ; or (which is more probable) by permafrost in the abutments and thawed ground beneath the river bed [12].

All of the above mentioned factors influence the choice of the type of structure and construction procedures.

En se basant sur ce que nous savons de l'expérience russe, la solution la plus rationnelle et la plus prometteuse est la construction de barrages en matériaux meubles avec une centrale souterraine et l'évacuation de l'écoulement par des tunnels pendant la construction. Ce modèle, à exigences moins strictes pour la déformabilité et la robustesse des fondations, autorise des travaux de construction pendant toute l'année dans des conditions assez favorables, qui permettent d'utiliser un processus complexe de mécanisation des opérations et donc, de réduire les coûts de la main d'œuvre.

L'expérience montre qu'il est possible de construire des barrages avec tous les types de sols et sur presque tous les types de fondations [5, 15, 22, 25, 27, 36, 39].

3.2. PROJETS HYDROÉLECTRIQUES AVEC DES BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES

On peut construire des barrages en matériaux meubles dégelés et gelés sur le pergélisol. Le complexe formé par les fondations, le barrage et le réservoir est considéré comme un système mixte naturel et artificiel. On considère que le barrage est de type gelé si son imperméabilité est assurée par l'état de congélation de sa partie imperméable et de ses fondations. Aucun dégel du sol n'est permis à l'intérieur du noyau, et il n'y a aucune communication hydraulique entre les parties amont et aval.

On considère que le barrage est de type dégelé si sa partie imperméable a une température positive et permet la percolation à l'intérieur des limites de la conception. Si les fondations sont formées de matériaux dégelés et gelés, on peut congeler les parties dégelées ou décongeler les parties gelées des fondations. La congélation de certaines zones du barrage comme la crête, les culées et le massif de recharge aval, est permise pendant la construction et/ou l'exploitation [5, 22, 27, 36, 39].

Les types de construction du barrage ci-dessus déterminent le type de modèle structural, qui dépend des conditions techniques et géocryologiques particulières, ainsi que de la disponibilité des matériaux de construction locaux. (Fig. 2) [39].

Dans les zones cryolitiques, on doit construire de préférence des barrages de type dégelé avec un noyau incliné protégé de la congélation. Ce modèle, qui fait appel à des technologies plus complexes, permet de construire les massifs de recharge indépendamment du noyau.

Dans les zones cryolitiques, les barrages en matériaux meubles de type dégelé diffèrent de ceux qui sont construits à l'extérieur de ces zones surtout par les caractéristiques de leurs réseaux de drainage et par la qualité des matières placées dans diverses parties de l'ouvrage, qui gèlent ou dégèlent selon les changements des températures saisonnières. Ce mode de construction s'applique habituellement aux ouvrages sur des fondations rocheuses partiellement ou totalement composées de matières de pergélisol faiblement compressibles après leur dégel [36, 39].

La CH de Viluiskaïa I, d'une capacité de 650 MW, a été construite dans des conditions climatiques très rigoureuses, sur de la dolérite à inclusions de xénolite (une roche sédimentaire plus friable), dans une zone de pergélisol continu de plus de 350 m d'épaisseur.

As justified by the available Russian experience, the most rational and promising solution is the embankment dam with an underground power plant and the release of flow during construction through tunnels. With such a scheme, the requirements for foundation deformability and strength are liberalized, and the construction works can be performed the year round under rather favorable conditions, allowing to introduce a complex mechanization of operations and therefore to reduce labor costs.

The available experience proved the possibility of building dams with all types of soils and on almost all types of foundations [5, 15, 22, 25, 27, 36, 39].

3.2. HYDRO POWER PROJECTS WITH EMBANKMENT DAMS

Embankment dams of both the thawed and the frozen types can be built on permafrost. The complex foundation-dam-reservoir is considered as a combined natural and engineering system. The dam is considered frozen if its imperviousness is provided by the frozen state of the impermeable portion and its foundation. No soil thawing is permitted within the core. No hydraulic connection exists between the upstream and downstream sides.

The dam is considered thawed if its impervious portion has a positive temperature and allows seepage within the design limits. If the foundation is composed of both thawed and frozen soils, freezing of thawing parts and thawing of frozen parts of the foundation are allowed. Freezing of some zones of the dam such as the crest, the abutments and the downstream shell is allowed during the construction and/or operation [5, 22, 27, 36, 39].

The above types of dam construction determine the structural design which is influenced by special features of the engineering-geocryological conditions and the availability of local construction materials. (Fig. 2) [39].

Dams of the thawed type in cryolitic zones shall preferably be built with an inclined core protected from freezing. This design is more technological and allows construction of the shells independently of the core.

Embankment dams of the thawed type in cryolitic zones differ from those constructed outside these zones mainly by the characteristics of the drainage systems and the quality of materials placed in various parts of the structure which are frozen and thawed under seasonal temperature changes. It normally applies to structures on rock foundations partially or totally composed of permafrost materials poorly compressible after thawing [36, 39].

Vilujskaya HPP I of 650 MW capacity was built on dolerite with inclusions of xenolite (a weaker sedimentary rock) in very severe climatic conditions in a zone of continuous permafrost more than 350 m thick.

Le barrage en enrochement, de 75 m de hauteur et de 635 m de longueur en crête, a une largeur de 310 m à la base. Il comporte une galerie d'injection et un noyau de pierre concassée et de loam. Le barrage forme un réservoir de 35 km³. La Fig. 3 montre le type général d'implantation des ouvrages au cours de la première étape de la construction. Le canal d'approvisionnement en eau des turbines, qui évacue aussi l'excès d'eau par le déversoir, est creusé en suivant la pente naturelle de la rive droite, de manière à contourner le barrage. Le déversoir, d'une largeur de 40 m, est fermé par des vannes à plusieurs segments de 14 m de hauteur. La prise d'eau est située sur le côté gauche du canal, en amont de la structure du déversoir. L'eau est acheminée par quatre tunnels jusqu'aux turbines de la salle des machines, qui est située dans une galerie profonde creusée dans la roche. Les canalisations d'aspiration sont de type tunnel. Le poste d'interconnexion abrité est situé au-dessus des tunnels des conduites forcées, entre la centrale électrique et la prise d'eau [4, 5, 6].

Pendant qu'on achevait la première étape de la construction, on a entrepris la construction des ouvrages le long du rivage et de la centrale électrique, sur la rive gauche. Le modèle d'implantation prévoyait un canal d'approche avec des murs de retenue et de protection, une prise d'eau, des canalisations, un bâtiment abritant la centrale avec une annexe, un canal en aval et un poste d'interconnexion abrité. Tous les ouvrages ont été construits dans une excavation à ciel ouvert dans le roc [4, 5, 6].

Pendant la conception de la première étape des travaux, il a été décidé de combiner les canaux d'alimentation des turbines et le déversoir, afin de pouvoir construire tous les ouvrages dans la dolérite, à l'extérieur la zone xénolitique [11,9].

Le type de barrage a été déterminé par la présence de dolérite massive dans les fondations et la disponibilité de sables graveleux et loameux acceptables dans la partie imperméable.

Le noyau est relié aux fondations par une dalle de béton armé et une galerie d'injection. Parce qu'on estimait que la perméabilité de dolérites dans la zone supérieure altérée de 3 à 5 m d'épaisseur était d'environ 10 m/jour, on a construit un rideau d'injections protecteur le long de l'axe, jusqu'à 30 m de profondeur à partir de la surface des fondations du barrage [5].

Le nombre de trous dans le rideau d'injections, au niveau des fondations du barrage et le long de tout le front de pression hydraulique, dépendait de la vitesse de dégel de la roche après le remplissage du réservoir, qu'on supposait être de 0,2 à 0,3 m/jour. Les mesures de surveillance de la température prises après la construction du réservoir ont indiqué que la vitesse de dégel sur la rive gauche était plus grande que celle dans la culée droite du barrage. Ces vitesses étaient presque égales au printemps de 1969.

L'étude à long terme du régime de température a montré que le pergélisol s'est développé dans le massif de recharge aval et ses fondations et qu'il s'est dégradé sous le massif de recharge amont (Fig. 9a) [13,14].

On peut considérer la CH de Kolymaskaïa comme un exemple d'implantation de barrage de terre et en enrochement. Le projet hydroélectrique comporte (Fig. 4a) [10, 33] :

The rockfill dam is 75 m high with a 635 m crest length and has a width of 310 m at the base. It includes a grouting gallery and a core of crushed rock and loam. The dam retains a reservoir of 35 km³ in volume. The general layout of the structures in the first stage of construction is shown in Fig. 3. The channel for water supply to the power intake and discharge of excess water through the spillway is cut into the natural slope of the right bank bypassing the dam. The spillway with a span 40 m wide is closed by 14 m high segment gates. The water intake is on the left side of the channel upstream of the spillway structure. The water flows through 4 tunnels to the turbines of the generator hall, which is located in a deep rock excavation. Suction pipes are tunnel type. The indoor switchyard is located above the penstock tunnels between the powerhouse and the water intake [4, 5, 6].

Simultaneously with the completion of the first stage of construction, the building of the structures along the water front and the powerhouse on the left bank were started. The layout consisted of: an approach channel with retaining and protecting walls, a water intake, pipe conduits, a power plant building with a subsidiary block, a downstream channel and an indoor switchyard. All the structures are in an open rock excavation [4, 5, 6].

During the design of the first stage, it was decided to combine the intake channels of the power plant and the spillway, which made it possible to locate all the structures in dolerite, outside the xenolithic area [11,9].

The dam type was determined by the presence of solid dolerite in the foundation and the availability of gravelly-loamy soils acceptable in the impervious portion.

The core is connected to the foundation by a reinforced concrete plate and a grouting gallery. Due to the fact that the permeability of dolerites in the 3 - 5 m thick upper weathered zone was estimated to be about 10 m/day, a protective grout curtain was constructed all along the axis down to 30 m depth from the dam foundation surface [5].

The number of holes included in the grout curtain at the dam foundation level and along the whole pressure front depended on the thawing rate of the rock after reservoir filling, which was assumed to be 0.2 - 0.3 m/day. The temperature monitoring arranged after the construction of the reservoir indicated that the thawing rate in the left bank was higher than in the right abutment of the dam. These rates were almost equal by the spring of 1969.

The long term study of the temperature regime has shown that permafrost developed in the downstream shell and its foundation and permafrost degraded under the upstream shell (Fig. 9a) [13, 14].

Kolymenskaya HPP may be considered as an example of a dam layout with earth-rock materials. The hydropower project incorporates (Fig. 4a) [10, 33]:

- des barrages en enrochement (principal et temporaire) à noyau central en argile ; le batardeau est intégré dans la partie amont du barrage principal ;
- un canal temporaire sur la rive droite, d'un débit nominal d'évacuation de 10 500 m³/s, avec une probabilité de 0,5 % ;
- un canal permanent sur la rive gauche, avec trois ouvertures pour le déversoir, dont chacune, d'une largeur de 15 m, a un débit d'évacuation total de 11 500 m³/s ;
- une dérivation temporaire pour les trois premières turbines, comportant une prise d'eau temporaire pour celles-ci, le tunnel de la prise d'eau de cette voie temporaire et une salle de commande pour l'exploitation et les vannes d'urgence ;
- une entrée permanente pour les conduites forcées, de 6 m de diamètre ;
- une centrale souterraine ;
- un bâtiment de production (avec des locaux techniques et une salle de commande), le poste de commutation intérieur de 220 kV, l'atelier des transformateurs, la station de lubrification et le service d'incendie.

L'implantation du projet hydroélectrique prévoyait des travaux de construction en deux étapes.

Au cours de la première étape, trois turbines sont entrées en production avec une charge de pression réduite de 40 à 56 m. La première étape prévoyait la construction des ouvrages suivants : le batardeau, l'exutoire, le système de dérivation temporaire, une partie du bâtiment de production et des locaux techniques, ainsi que la centrale souterraine.

Au cours de la deuxième étape, on a construit le barrage principal d'une hauteur de 130 m, et on a installé la prise d'eau permanente et l'exutoire sur la rive droite.

Le batardeau est un ouvrage en enrochement avec un noyau loameux central, deux zones de filtres en aval et une seule en amont [10]. Sa hauteur maximale est de 62,2 m, la longueur de sa crête, de 470 m, la largeur de sa crête, de 15 m, et sa largeur au niveau des fondations, d'environ 200 m. Le barrage est recourbé sur le plan horizontal, c'est-à-dire convexe vers l'amont. On a évalué les pentes extérieures, la largeur de la berme et les rayons mesurés à partir de l'axe du barrage en tenant compte de l'incorporation du batardeau dans le barrage principal. Le noyau du barrage est constitué de galets et de loam graveleux, dont 70 % de la granulométrie est supérieure à 2 mm. Le noyau a une largeur permanente de 4,5 m dans les 10 m du haut, mais, sous ce niveau, ses rebords sont inclinés selon une pente de 1 : 0,25, qui crée un gradient de pression de 2 dans la partie inférieure du noyau.

Le premier milieu filtrant en amont jouxtant le noyau est fait de sable à grain moyen, et la deuxième zone et le filtre unique en amont, d'un mélange de gravier et de sable. La largeur horizontale du filtre amont est de 4,5 m, et celle du filtre aval est comprise entre 2,5 et 4,5 m.

Les massifs de recharge sont faits de roches granitiques non triées provenant d'excavations et de carrières.

- main and temporary rockfill dams with a central clay core ; the cofferdam is included in the upstream part of the main dam ;
- temporary channel on the right bank, with a design spilling capacity of 10 500 m³/s with a 0.5 % probability ;
- permanent water channel on the left bank with three spillway openings 15 m width each for a total discharge of 11 500 m³/s ;
- temporary diversion route for the first three generators consisting of a temporary power intake, the intake tunnel of the temporary diversion route and a control room for operation and emergency gates ;
- permanent intake for penstocks 6 m in diameter ;
- underground power plant ;
- production, technological and control building, the 220 kV indoor switchboard, the transformers workshop, the oil-lubricant station and the fire fighting department.

The layout of the hydropower project anticipated a construction in two stages.

In the first stage, three generators were put into operation at a reduced head of 40 to 56 m. The first stage included the following structures: cofferdam, outlet, temporary diversion system, a part of the production and technological building and the underground power plant.

In the second stage, the main dam was built to the height of 130 m, and the permanent intake and outlet were installed on the right bank.

The cofferdam is a rockfill structure with a central loamy core, two filter zones downstream and a single filter zone upstream [10]. Its maximum height is 62.2 m, the length along the crest 470 m, the crest width 15 m and the width at the foundation level about 200 m. The dam is curved in the horizontal plane, being convex towards the upstream side. The outer slopes, the berms width and the dam axis radii were evaluated taking into account the incorporation of the cofferdam into the main dam. The dam core is constructed with a pebble and gravel loam containing a 70 % fraction coarser than 2 mm. The core has a permanent width of 4.5 m in the upper 10 m but below this level its edges are inclined with a 1:0.25 slope, providing for a pressure gradient of 2 in the lower part of the core.

The first downstream filter adjacent to the core is made of a medium grained sand, the second zone as well as the upstream single filter are a gravel-sand mixture. The horizontal width of the upstream filter is 4.5 m, and the horizontal width of the downstream filter is variable from 2.5 to 4.5 m.

The shells were built using non-graded granite rock from excavations and quarries.

Le batardeau, d'une hauteur de 60 m, a été construit en 15 mois, à un rythme mensuel maximal de 22 m certains mois. Pendant cette période, on a commencé à remplir le réservoir (jusqu'à un niveau de 372 m), puis, il a été vidé et rempli à nouveau jusqu'à un niveau de 384 m. Après chaque remplissage, on a observé le développement d'un processus de dégradation se traduisant par une déformation sur la crête du batardeau. L'observation de percolation et de turbidité dans l'eau, après trois mois d'exploitation à un niveau de 382 à 384 m, était un signe de stabilisation du processus de percolation et d'absence de suffusion dans le corps du batardeau.

Le batardeau, construit rapidement dans des conditions climatiques rigoureuses, fonctionnait correctement.

Le barrage principal en enrochement (Fig. 4b) a un noyau central de 130 m de haut, une longueur en crête de 780 m, une largeur de crête de 15 m et une pente moyenne des massifs aval et amont de 1 : 1,8 et de 1 : 1,7 respectivement.

On a mis en place un tapis d'injection de 3,5 x 4 m et un rideau de 30 m de profondeur dans les fondations du noyau du barrage. Sous le noyau et le premier filtre amont, les fondations rocheuses sont recouvertes par une dalle de béton.

La section longitudinale du barrage est trapézoïdale, avec une inclinaison moyenne de 1 : 1,5 pour la pente de la rive droite et de 1 : 2,2 pour celle de la rive gauche, et un rapport hauteur-largeur moyenne du barrage de 1 : 3,8.

Le noyau du barrage est fait de gravier à gros grains avec des cailloux et un remplissage sableux et loameux ($d < 2$ mm). Il a été mis en place à une température de -20°C en couches d'une épaisseur de 30 à 40 cm nivelées par des bouteurs.

À cause de l'aplatissement de la partie inférieure du noyau, la largeur de ses fondations au niveau de la section transversale maximale est de 50 m, avec un gradient de pression inférieur à 2,5.

Le filtre amont à zone unique, sous le niveau de la réserve, est fait d'un mélange de gravier et de sable. Au-dessus de ce niveau, il y a une double zone de filtres.

Le filtre aval est double sur toute la hauteur du noyau. Le premier filtre est fait de sable à grains moyens, et le deuxième filtre, des mêmes matériaux que le filtre amont. Pour améliorer la résistance à la suffusion du filtre amont, la deuxième zone a été élargie à 20 m dans sa partie inférieure. Les massifs de recharge du barrage sont en enrochement.

La Fig. 5 indique la granulométrie des matériaux.

On a apporté des améliorations au projet pendant les étapes de la conception et de la construction du barrage, notamment pour la partie supérieure du noyau et pour l'épaisseur des zones de filtre dans la partie supérieure du barrage. Au début, la partie supérieure du noyau atteignait le niveau maximal d'exploitation. L'épaisseur de la couche protectrice au-dessus du noyau était inférieure à 0,5 m, ce qui pouvait entraîner la destruction de la crête du barrage à cause du soulèvement par le gel pendant l'exploitation [8, 14]. Par ailleurs, ce type de construction ne permettait pas d'utiliser de la machinerie lourde à cause de la faible largeur des zones de filtration (de 1,7 à 3,0 m dans les 10 m de la partie supérieure du barrage).

The cofferdam was built to a height of 60 m within 15 months; during some months, the construction rate reached 22 m per month. During this period, the reservoir was partially filled (to the level 372 m), then it was emptied and refilled to the level of 384 m. After each filling, there was an observed decaying activation of deformation on the cofferdam crest. Observation of seepage and water turbidity after 3 months operation at the level of 382 - 384 m indicated stabilization of the seepage process and the absence of suffusion in the cofferdam body.

The cofferdam constructed rapidly in severe climatic conditions proved to be operable.

The main rockfill dam (Fig. 4b) has a central core 130 m high, a 780 m crest length, a 15 m crest width and average upstream and downstream slopes 1:1.8 and 1:1.7 respectively.

A 3.5 x 4 m grout blanket and a 30-m deep curtain is arranged in the dam core foundation. The rock foundation under the core and the first downstream filter is covered with a concrete slab.

The longitudinal section of the dam is trapezoidal with an average inclination of the right bank slope of 1:1.5 and the left bank slope of 1:2.2 and a ratio of the dam height to its average width of 1:3.8.

The core of the dam is made of a coarse-grained gravel with rubbles and a sandy loamy filler ($d < 2$ mm). It was placed at a temperature of -20°C in 30 - 40 cm thick layers levelled by bulldozers.

Due to flattening of the lower part of the core, its foundation width at the maximum cross section is 50 m with a pressure gradient of less than 2.5.

The upstream filter below the dead storage level is a single zone made of a gravel-sand mixture. Above the dead storage level, there is a double zone of filters.

The downstream filter is double along the whole height of the core. The first filter is a medium grained sand, the material of the second filter is the same as for the upstream filter. To improve suffusion stability of the downstream filter, the second zone was expanded to 20 m in its lower part. The shells of the dam are rockfill.

The grain size distribution of the materials is shown in Fig. 5.

Improvements were made during the design and construction of the dam. In particular, it referred to the upper part of the core and the thickness of filter zones in the upper part of the dam. At the beginning, the top of the core reached the maximum operating level. The thickness of the protection layer above the core was less than 0.5 m, which could lead to a destruction of the dam crest by heaving during operation [8, 14]. Besides, the above construction detail did not allow to use much mechanization due to the small width of filter zones (from 1.7 to 3.0 m in the upper 10 m of the dam). The above limitations were avoided in the design of the dam crest finally adopted (Fig. 6b). The upper part of the loamy core was lowered by 4 m and

On a évité ces limitations en choisissant un type de crête mieux adapté (Fig. 6b). La partie supérieure du noyau loameux a été abaissée de 4 m et recouverte avec le sable de la première zone de filtre, auquel on avait rajouté 20 % d'un mélange de gravier et de sable. Ainsi, l'épaisseur de la couche protectrice a été portée à 4,5 m, afin de réduire le danger de fissuration par le gel dans la crête du barrage. La largeur minimale des filtres a été portée à 2,5 m [29, 30].

La seule exigence pour les matériaux d'enrochement était qu'ils résistent au gel. En cas de pénurie de matériaux très résistants, on peut utiliser des matériaux moins résistants s'ils réussissent l'essai de résistance à l'altération cryogénique. Ainsi, compte tenu des conditions de la CH d'Ust-Srednekanskaïa, l'utilisation de matériaux semi-rocheux était permise dans les zones internes du barrage, si les résultats des essais géophysiques l'autorisaient [31, 39, 41].

La CH de Viluiskaïa III est un exemple typique d'ouvrage hydraulique construit sur des fondations en matériaux gelés et dégelés. Les conditions techniques et géologiques étaient très complexes. Le talik du lit, d'une largeur maximale de 160 m, est constitué de marne argileuse avec des intercouches occasionnelles de dolomite, de calcaire et de siltite. À cause de l'altération cryogénique, de la formation de glace, du soulèvement, d'échanges entre les eaux salines souterraines et l'eau douce de surface, le substrat rocheux était transformé en gravier et en blocs sur l'ensemble des couches supérieures de la vallée. L'épaisseur de cette zone pouvait atteindre 50 m. Il y avait des couches de pergélisol de roche sédimentaire dans les culées de la rive. La rive droite était composée en grande partie de loams de carbonate avec des graviers à faible résistance, de marnes argileuses et de marnes remplies de loam, d'une teneur en glace comprise entre 5 et 40 %. Sur la rive gauche, on a trouvé des formations de glissement de terrain constituées d'aleurites, de marnes et de dolomites altérées, avec de grandes fissures partiellement remplies de loam et de glace. La teneur en glace de la roche gelée, notamment dans les fissures, pouvait atteindre 50 % [12, 16].

Les roches des fondations étaient partiellement salinisées.

Le projet d'implantation prévoyait que les fondations de la centrale électrique seraient situées sur le lit du cours d'eau dégelé. Le front d'eau de 530 m de long est créé par le barrage de la rive gauche de 142 m de long, la centrale électrique de 146 m de long combinée au déversoir qui repose sur le talik du lit, et le barrage de rive droite, de type dégelé, de 273 m de long [42].

Pour la construction des barrages de la rive gauche et de la rive droite, on a choisi des matériaux meubles avec des noyaux centraux loameux et des massifs de recharge en enrochement. La hauteur maximale du barrage était de 59 m et la tête d'eau nominale de 23,3 m. Les fondations reposaient sur des sols soulevés par le gel, ce qui pouvait causer un tassement non uniforme considérable après le dégel.

Les fondations gelées des barrages des rives gauche et droite devraient dégeler pendant l'exploitation du réservoir ; la valeur de tassement nominal calculée est comprise entre 1 et 1,5 m. Pour assurer la stabilité structurale des fondations, on a mis en place les dispositifs imperméables suivants : injection de coulis dans la structure des canaux de fuite et de la culée de la partie supérieure du puits d'excavation ; construction d'un rideau d'injections et d'un drain vertical (à partir de la galerie du pied amont) ; un tablier imperméable de 20 m de longueur avec un rideau d'étanchéité sur le côté amont, et des enrobages étanches autour des bâtiments de la centrale et des parties supérieures des massifs de recharge.

refilled with sand of the first filter zone with the addition of 20% of a gravel-sand mixture. Therefore the thickness of the loading protection layer was increased to 4.5 m, reducing the danger of frost cracks in the dam crest. The minimum width of filters was increased to 2.5 m [29, 30].

The only requirement for rockfill material is its frost resistance. In cases of shortage of highly resistant materials, less resistant materials can be used if proved adequate by cryogenic weathering resistance tests. Thus, for the conditions of Ust-Srednekanskaya HPP, the use of semi-rock material in the internal zones of the dam was permitted according to results from geophysical tests [31, 39, 41].

Vilujskaya HPP III is a typical example of an hydraulic structure built on a foundation of both frozen and thawed soils. Engineering-geological conditions were very complicated. The width of the bed talik consisting of clayey marl with occasional interlayers of dolomite, limestone and siltstone did not exceed 160 m. Due to cryogenic weathering, ice formation, heaving, exchanges between saline groundwater and fresh surface water, the bedrock was transformed into gravel and rubble soils along the whole contour of the valley. The thickness of that zone can reach 50 m. There were layers of sedimentary rock permafrost in the bank abutments. The right bank is predominantly composed of carbonate loams with gravels of low resistance, clayey marls and marls with loamy filling and an ice content varying from 5 to 40%. Landslide formations consisting of aleurites, marls and weathered dolomites with wide cracks partially filled with loam and ice were observed on the left bank. The ice content of the frozen rock especially in cracks is up to 50 % [12, 16].

The foundation rocks was partially salinized.

The layout of the power project provided for founding of the powerhouse on the thawed riverbed. The 530 m long water front is created by a 142 m long left bank dam, a 146 m long powerhouse combined with the spillway resting on the bed talik, and a 273 m long thawed type right-bank dam [42].

The left bank and right bank dams were designed as fill dams with loamy central cores and rockfill shells. The maximum height of the dams is 59 m, the design head being 23.3 m. The foundations are resting on frost-heaved soils which might cause considerable non-uniform settlement after thawing.

During reservoir operation, the frozen foundation of the left and right bank dams would be thawing. Design settlements of 1-1.5 m were determined. The following impervious elements were designed to provide structural foundation stability : grouting of outlet channels and the abutment of the upper portion of the excavation pit ; construction of a grout curtain and a vertical drain (from the gallery of the upstream toe) ; a 20 m long waterproof apron with a cutoff on the upstream side and installation of sealings around the power plant buildings and upper shells.

Les plans prévoyaient un dégel à l'aide d'éléments électriques jusqu'à une profondeur de 60 m et l'injection de coulis de ciment dans les fondations de la rive gauche et dans la culée, notamment dans la zone dégélée.

On a mis en place un rideau d'injections dans les fondations du barrage de la rive droite et dans la culée à partir des niveaux intermédiaires du barrage, avant le remplissage du réservoir. Les interfaces barrage-béton ont été remplies avec des matériaux terreux à teneur en humidité améliorée et à faible densité, pour éviter les fissures.

Les zones imperméables des barrages des régions du Nord sont habituellement construites avec des matériaux locaux comme des loams sableux, des loams et des loams mélangés avec des cailloux et du gravier. On note un intérêt croissant pour des dispositifs imperméables en acier et en béton bitumineux.

Les diaphragmes sont faits de feuilles d'acier d'au moins 12 mm d'épaisseur. Les diaphragmes protégés contre la corrosion peuvent durer 200 ans. Ils doivent être pourvus de dispositifs neutralisant la déformation dans le sens vertical et horizontal. Il doit y avoir une connexion fiable entre le diaphragme et les culées de la rive, notamment avec les fondations rocheuses. Afin d'obtenir un déplacement vertical uniforme des diaphragmes et des massifs de recharge, on construit un raccordement libre entre le diaphragme et la rive à l'aide de joints de scellement en bitume. Dans les climats très rigoureux, on remplace les joints soudés par des joints boulonnés.

Depuis quelque temps, on utilise des diaphragmes en béton bitumineux. Ce type de diaphragme a été accepté pour le barrage de la CH de Bogoutchanskaïa, dans la partie aval de la rivière Angara, et on considérait qu'il s'agissait de la solution de rechange la plus intéressante pour le barrage de la CH de Telmamskaïa, sur la rivière Vitim.

L'un des principaux avantages des diaphragmes en béton bitumineux est la possibilité de les construire dans toutes les conditions météorologiques parce qu'une baisse de 15 à 20°C de la température du mélange de béton bitumineux pendant le transport et la coulée n'affecte pas tellement ses propriétés, étant donné que sa température initiale est de 130 à 140°C [31, 39].

À toutes les étapes de la construction et de l'exploitation, les régimes de température influent fortement sur la stabilité statique et l'étanchéité des barrages en matériaux meubles construits dans des zones cryolitiques [4, 6, 8, 38, 40]. Les processus thermodynamiques sont les plus intenses dans la crête des barrages. En général, il n'y a pas de couverture de neige stable sur la crête, et lorsque le réservoir est vidé à l'automne, celle-ci est fortement altérée à cause des températures ambiantes de l'air sous zéro, accompagnées de grands vents.

Il y a plusieurs étapes de gel et de dégel de la crête, selon un processus dynamique complexe. Pendant le printemps et l'été, la crête du barrage dégèle de haut en bas. En novembre ou en décembre, on note le regel d'une zone de 3 à 4 m de la crête, dégélée en été, qui rejoint habituellement le pergélisol de la partie supérieure du massif de recharge aval. Il y a un fort dégel du noyau du barrage pendant l'été et l'automne à cause de la chaleur due à l'écoulement de percolation. En hiver, la crête du barrage gèle lorsque la température de l'eau de l'écoulement de percolation est voisine du zéro; alors, la couche supérieure des matières du

The design provided for an electrical thawing down to 60 m depth and cement grouting of the foundation of the left bank and abutment including the thawed zone.

A grout curtain in the foundation of the right bank dam and abutment was provided from intermediate levels of the dam before reservoir filling. The dam-concrete interfaces were filled with soils of improved moisture content and low density to prevent cracks.

Impervious zones of dams in northern regions are usually constructed with local sandy loams, loams and loams mixed with rubble and gravel. Steel and asphaltic-concrete impervious elements are presently attracting increasing interest.

The diaphragms are made of steel sheets at least 12 mm thick. If the diaphragm is protected against corrosion, it can operate for 200 years. Diaphragms shall be equipped with deformation neutralizers in the vertical and horizontal directions. A reliable connection between the diaphragm and the bank abutments shall be provided especially for rock foundations. In order to provide uniform vertical displacement of diaphragms and shells, a free connection between the diaphragm and the bank is made using bitumen seals. In specially severe climate, welded joints are replaced by bolted joints.

Bituminous concrete diaphragms are recently finding application. This type of diaphragm was accepted for the dam of Boguchanskaya HPP in the downstream portion of Angara river, and was considered the main design alternative for the dam of Telmamskaya HPP on Vitim river.

One of the main advantages of bituminous concrete diaphragms is the possibility to built them under any weather conditions due to the fact that a temperature reduction of the bituminous concrete mix by 15 - 20°C during transportation and placing would not affect its properties much since the temperature of the mix is 130 - 140°C [31, 39].

The static stability and impervious strength of embankment dams constructed in cryolitic zones is highly affected by temperature regimes at all stages of construction and operation [4, 6, 8, 38, 40]. Thermodynamic processes are most intensive in the crest of the dams. As a rule, no stable snow cover is found on the crest, and when the reservoir is emptied in the autumn, the crest of the dam is under the serious influence of negative ambient air temperatures accompanied by strong winds.

There are several stages of freezing and thawing of the crest following a complicated dynamic process. During spring and summer, the dam crest thaws from the top down. In November-December, a 3 - 4 m zone of the crest, thawed in summer, refreezes, usually reaching the permafrost of the upper part of the downstream shell. There is intensive thawing of the dam core during the summer and autumn due to the heat from the seepage flow. In winter, the crest of the dam freezes when the water temperature of the seepage flow is near zero ; thus the soil of the core is frozen on the upper portion with no heat flow from the lower portion of

noyau est gelée, et il n'y a plus de transfert de chaleur de la partie inférieure du noyau. Au printemps, il y a une montée rapide du niveau d'eau en amont, et la partie supérieure gelée du noyau est dégelée. Ainsi, des conditions hydrodynamiques complexes sont créées sous cette zone de gel du noyau.

Un processus de soulèvement et d'ameublissement cryogénique peut apparaître lorsque des sols argileux sont gelés et dégelés, spécialement dans des conditions d'augmentation de l'humidité capillaire, selon la masse volumique, la saturation et la teneur en particules de silt et d'argile. Donc, après le dégel, le sol peut prendre un état liquide ou plastique, c'est pourquoi il y a danger de destruction graduelle de la partie supérieure du système de protection contre le percolation, à cause d'une perturbation de la stabilité statique locale et de la résistance au percolation [14, 29, 30, 31].

Conformément au Règlement [12, 27], la partie supérieure du noyau ou du diaphragme devrait être plus élevée que le niveau maximal de l'eau (NME) et protégée du gel. Afin d'éviter que les matériaux terreux des noyaux et des filtres ne soient lessivés et en état de suffosion, il faut les protéger sur les côtés amont et aval par des filtres et par zones de transition. Les crêtes du barrage doivent être faites de divers types de sols et avoir une épaisseur totale comprise entre 1,5 et 3 m. Donc, les travaux d'étalement et de compaction de ces couches posent problème à cause de l'étroitesse de cet espace.

On examine ci-dessous la conception des crêtes de plusieurs barrages [30, 31, 34].

Le niveau normal de l'eau du barrage de la CH de Viluiskaïa-I, II est de 246 m et son niveau maximal, de 249 m. La crête du barrage a 8,74 m de largeur et il y a un parapet de béton de 1,5 m de hauteur du côté amont. Le noyau de loam s'élève jusqu'au niveau de 247 m et il est recouvert d'une couche de sable et de gravier de 2,5 m d'épaisseur, afin de réduire le gel de la partie supérieure et le soulèvement possible. Cette couche peut aussi servir de zone semi-perméable si le réservoir est rempli au-dessus du niveau de 247 m, en cas de conditions de niveau maximal d'inondation (Fig. 6). Le niveau d'eau du réservoir a déjà atteint sa hauteur maximale de 247,5 m une fois en vingt ans d'exploitation. Cette même année, on a observé les plus grands tassements dans diverses parties du barrage. Des fractures longitudinales sont apparues dans la partie inférieure de la crête à cause de différences entre les tassements du massif de recharge amont dégelé et du noyau, d'une part, et du massif de recharge aval gelé, d'autre part.

À la CH de Viluiskaïa-I, II, on a observé des déformations saisonnières dues au soulèvement dans la partie supérieure du noyau jusqu'à une profondeur comprise entre 0,3 m et 2 m, avec une amplitude de 2 à 9 mm. Cela ne mettait pas en danger le barrage.

La crête de la CH de Kolymskaïa a une largeur de 15 m. Il y a cinq zones de sol dans cette crête, dont l'épaisseur est comprise entre 2,5 et 5 m (Fig. 6b). La partie supérieure du noyau est à 454 m, soit à 0,4 m au-dessus du niveau d'eau prévu du réservoir, avec une période de récurrence de 1 : 1 000. On suppose que le niveau normal de l'eau est de 451,5 m. Pour une probabilité de récurrence de 0,1 %, le niveau maximal de l'eau est de 458 m. Le sol du noyau sous la crête a été remplacé par un mélange de gravier sableux de 4,5 m d'épaisseur pour protéger le noyau du gel.

the core. During the spring, there is a sharp rise of the upstream water level, the upper frozen part of the core is thawed. Complicated hydrodynamic conditions are thus created under that frozen zone of the core.

The process of cryogenic heaving and loosening may develop when clay soils are frozen and thawed, especially under conditions of capillary rise of moisture, depending on density, saturation and content of silt and clay particles. Therefore, after thawing, the soil could take the liquid or the plastic state. That is why there is a danger of gradual destruction of the upper part of the seepage protection system due to disturbance to local static stability and seepage strength [14, 29, 30, 31].

As required by the Regulations [12, 27], the top of the core or diaphragm should be higher than the maximum water level (MWL) and protected from freezing. To prevent the soil of cores and filters from washing-out and suffusion, they have to be protected on the upstream and downstream sides by filters and transition zones. The crests of the dams shall consist of various soils giving a total thickness of 1.5 - 3 m. Therefore there is a serious problem spreading and rolling these layers in such a narrow space.

The design of the crest of several dams is discussed below [30, 31, 34].

The normal water level at the dam of Vilujskaya HPP-I,II is 246 m and the maximum water level 249 m. The crest of the dam is 8.74 m wide and there is a concrete parapet 1.5 m high on the upstream side. The core of loam is constructed up to the level of 247 m and is covered with a sand and gravel layer 2.5 m thick to reduce freezing of the upper part and possible heaving. This layer can also serve as a semi-pervious zone in the case of reservoir filling above the level of 247 m when discharging the maximum flood (Fig. 6). A maximum rise of water level in the reservoir to 247.5 m occurred once in 20 years of operation. The same year, the greatest settlements of various parts of the dam were experienced. Longitudinal cracks appeared in the lower part of the crest due to the difference in settlements of the thawed upstream shell and core (on one hand) and the frozen downstream shell (on the other hand).

Seasonal deformations resulting from heaving in the upper portion of the core down to a depth between 0.3 m and 2 m with an amplitude of 2 to 9 mm were observed at Vilujskaya HPP-I, II. These incidents were not a threat to the dam.

The crest of Kolymenskaya HPP is 15 m wide. There are 5 zones of soils across the crest varying from 2.5 to 5 m thick (Fig. 6b). The top of the core is 454 m, that is 0.4 m higher than the anticipated water level in the forebay for a return period of 1:1000. The normal water level assumed to be 451.5 m. The maximum water level for a discharge of 0.1 % probability is 458 m. The material of the core in the crest was replaced by a sandy-gravel mixture 4.5 m thick to protect the core from freezing.

Pendant les neuf années d'exploitation du réservoir, le niveau de celui-ci était d'environ 452 m. Pendant le premier remplissage, il y a eu un tassement intensif du massif de recharge amont, qui a causé des fractures longitudinales. Ces fissures ont été remplies, ou se sont refermées d'elles-mêmes ultérieurement. Elles ne présentaient aucun danger pour la stabilité et la fiabilité du barrage.

Selon des mesures du régime de température dans la crête du barrage effectuées avec l'aide d'instruments placés dans des trous forés à partir de la crête, on a constaté que les variations saisonnières de la température du noyau atteignaient une profondeur significative, de 7 à 11 m (Fig. 7). On a observé en même temps une zone de crête dont les températures étaient positives, entre les stations 5+95 et 5+82 (Fig. 7).

À la fin de septembre 1995, la crête du barrage était dégelée jusqu'à une profondeur de 11 m. Dans certaines parties de la crête, la profondeur de dégel était beaucoup plus faible (jusqu'à 5 m). Il y avait une couche de matériaux de noyau gelés de 4 à 10 m d'épaisseur dans une partie importante du barrage, entre les stations 5+14 et 0+15.

La largeur de la crête de la CH de Kureiskaïa est de 10 m. La hauteur du sommet du noyau est de 95,5 m au-dessus du niveau normal de l'eau, avec une tolérance 0,5 m. La largeur du sommet du noyau est de 4 m (Fig. 6c).

La profondeur nominale du gel saisonnier est de 4 m. La hauteur de la crête du barrage a été déterminée en fonction des conditions requises pour protéger le noyau contre le gel.

La couche protectrice devait être constituée de terre exempte de particules de plus de 10 mm. On a constaté que la terre de la couche protectrice n'avait pas le degré d'imperméabilité requis. Son coefficient de perméabilité, compris entre 8 et 90 m/jour, dépassait la valeur prescrite (8 m/jour).

La crête du barrage est influencée par le processus saisonnier de gel et de dégel. La profondeur de la couche de gel saisonnier peut varier de 2 à 9 m. On n'a noté aucun ameublissement de la terre.

La partie supérieure du noyau peut être construite avec des sols salins (par exemple, avec une concentration de NaCl par mètre cube de sol compacté quatre fois supérieure à la normale). L'utilisation de ces types de sol pendant la construction des CH de Viluiskaïa et de Khantasjkaïa a donné de bons résultats [6, 31, 34, 39].

Il est logique d'utiliser des terres non cohésives sans soulèvement (sables à grains de grosseur variable, mélanges de gravier et de sable, etc.) dans la partie supérieure du barrage au-dessus du niveau maximal de l'eau, ou d'installer des membranes ou des diaphragmes en d'autres matériaux que la terre [27, 39].

Dans certains cas, la partie supérieure du noyau peut être construite avec des terres à faible soulèvement jusqu'au niveau maximal d'inondation, sans couche protectrice.

Les exemples disponibles de construction et d'exploitation de barrages en matériaux meubles dans les régions cryolitiques indiquent que les ouvrages de revanche ne sont pas tous adéquats et entièrement satisfaisants, du point de vue des exigences de sécurité opérationnelles [34].

During the 9 years of reservoir operation, its level was close to 452 m. During the first filling, there was an intensive settlement of the upstream shell causing longitudinal cracks. The cracks were either filled or closed themselves later. These cracks presented no danger to dam stability and reliability.

Observation of the temperature regime in the dam crest with the help of instrumentation installed in boreholes drilled from the top has shown a significant depth of seasonal variations of the core temperature from 7 to 11 m (Fig. 7). At the same time, there was a region of the crest with positive temperatures between stations 5+95 and 5+82 (Fig. 7).

At the end of September 1995, the crest of the dam was in a thawed state down to 11 m depth. There were parts of the crest where the depth of thawing was much less (down to 5 m). There was a layer of frozen core material from 4 to 10 m thick within a significant part of the dam between stations 5+14 and 0+15.

The width of Kureiskaya HPP crest is 10 m. The elevation of the core top is 95.5 m with 0.5 m tolerance above the normal water level. The width of the core top is 4 m (Fig. 6c).

The design depth of seasonal freezing is 4 m. The elevation of the dam crest was chosen to meet the conditions required to protect the core against freezing.

The protection layer was supposed to be filled with a soil free of particules larger than 10 mm. It turned out that the soil of the protection layer did not have the impermeability required. The permeability coefficient was between 8 and 90 m/day, while the required one was 8 m/day.

The dam crest is influenced by the seasonal process of freezing and thawing. The depth of the seasonal freezing layer can vary from 2 to 9 m. No loosening of soils has been observed.

The upper part of the core can be constructed with salinated soils (for example four normally NaCl per cubic meter of compacted soil). Using these soil types during the construction of Vilujskaya and Khantasjkaya HPP gave positive results [6, 31, 34, 39].

It is reasonable to use non-heaving cohesionless soils (sands of various grain composition, gravel-sand mixtures, etc.) in the upper portion of the dam above the maximum water level, or to install membranes or diaphragms of non-soil materials [27, 39].

In particular cases, the upper part of the core may be constructed with weak- and faintly-heaved soils up to the maximum flood level without arranging a protective layer.

Available examples of construction and operation of embankment dams in cryolitic areas show that not all the freeboard structures proved adequate and completely satisfactory in terms of operational safety requirements [34].

L'épaisseur de la couche protectrice au-dessus du noyau du barrage Viluiskaïa était de 2,5 m, celle du barrage de Kureiskaïa, de 4 m et celle du barrage Kolymaskaïa, de 4,5 m. Des observations sur place des régimes de température dans les crêtes du barrage ont montré que la profondeur réelle du gel était de 1,5 à 2 fois plus élevée que la valeur nominale, soit de 9 m pour le barrage de Kureiskaïa et 11 m pour celui de Kolymaskaïa. Donc, les couches protectrices n'empêchent pas les cycles de gel et de dégel saisonniers dans la partie supérieure du noyau sous les crêtes des barrages ; toutefois, on n'a pas observé d'effets négatifs pour ces barrages.

Par ailleurs, on estime que l'une des raisons possibles de l'excès de percolation et de suffosion des matériaux, au moment de la rupture du barrage en 1992, est la mise en place, à l'intérieur de la crête du barrage Kureiskaïa, de matériaux terreux à coefficient de perméabilité plus élevé qui ne se soulevaient pas [34].

3.3. CONCEPTION DE L'ÉQUIPEMENT FRIGORIFIQUE POUR LE BOUCLIER DE GLACE

La limitation des effets thermiques des passages d'eau sur les fondations et le corps du barrage est l'une des conditions pour assurer la sécurité et la fiabilité des projets de barrage du type gelé. On utilise à cette fin divers types d'équipements frigorifiques (à l'air, à liquide, de type vapeur-liquide) [27, 39].

Le système frigorifique utilisé pour créer un bouclier de glace sous le déversoir de la CH d'Irelyakhaskaïa était constitué d'un rang vertical de tuyaux horizontaux dans une tranchée remplie de loam (Fig. 8a). Les extrémités de ces tuyaux, connectées à des collecteurs verticaux, atteignaient la surface dans les murs du canal d'évacuation. Des ventilateurs soufflaient de l'air froid dans ce réseau. Ce système de refroidissement est tombé en panne au cours de la première année d'exploitation parce que de la glace avait bouché des sections de tuyaux. On n'avait pas prévu la possibilité de réparer le réseau au cours de l'étape de la conception.

Le projet hydroélectrique d'Oyur-Yurege prévoyait aussi l'utilisation de colonnes de refroidissement verticales. Certains problèmes sont apparus pendant la construction du déversoir à cause du besoin d'équipements supplémentaires pour l'approvisionnement en air des colonnes et pour leur conservation pendant la saison chaude.

Le système frigorifique (Fig. 8b) comporte des colonnes de congélation verticales, des connexions détachables, des évacuateurs de pression et des collecteurs de drainage. Ces colonnes ont été installées sous la partie supérieure du déversoir, avec des renforcements spéciaux pour la préservation des colonnes et leurs connexions aux collecteurs. Un mur de béton coulé sous le déversoir empêche la percolation pendant le dégel saisonnier des matériaux terreux des fondations.

L'inconvénient de ce système est le coût de la main d'œuvre associé à la préservation de chacune des colonnes de congélation au cours du montage et du démontage des connecteurs.

Il faut noter que ce type d'ouvrage peut être intéressant si la largeur du déversoir est plutôt faible (de 10 à 15 m).

The thickness of the protection layer above the core of Vilujskaya dam was taken as 2.5 m ; at Kurejskaya dam as 4 m and at Kolymskaya dam as 4.5 m. In-situ observations of temperature regimes in the dam crests have shown that the actual depth of freezing is 1.5 - 2 times higher than the design value: 9 m at Kurejskaya dam and 11 m at Kolymskaya dam. Therefore, protection layers do not prevent from seasonal freezing-thawing in the upper part of the core in the crests of dams ; however no negative consequences were observed at those dams.

At the same time, non-heaving soils with a higher permeability coefficient placed in the crest of Kurejskaya dam is one of the possible reasons for too much seepage and suffusion of materials at the time of the dam failure in 1992 [34].

3.3. DESIGN OF REFRIGERATING EQUIPMENT FOR FROZEN SHIELDS

To limit the heating effects of water passages on the dam foundation and body is one of the reliability safety conditions on dam projects of the frozen type. Various types of freezing equipment (air, liquid, vapor-liquid) are used for that purpose [27, 39].

The refrigerating system used to create a frozen shield under the spillway of Irelyakhskaya HPP was a vertical row of horizontally oriented pipes in a trench filled with loam (Fig. 8a). The ends of the pipes were connected with vertical collectors, coming to the surface on the sides of the outlet channel. Cold air was blown through the system with fans. The cooling system failed during the first year of operation due to pipe sections getting plugged with ice. The possibility to repair the system was not prescribed in the design.

Vertical cooling columns were also designed in the hydro project of Oyur-Yurege. Some problems appeared during the construction of the spillway structure because of the need of additional equipment for air supply to the columns and their conservation during the warm season.

The refrigerating system (Fig. 8b) incorporates vertical freezing columns, detachable connections, pressure and outlet collectors. The columns were installed beneath the top of the spillway with special recesses for column conservation and connections to the collectors. A concrete wall under the spillway prevents seepage during the seasonal thawing of the foundation soils.

The drawback of this system is the labor-cost associated with the preservation of each freezing column when mounting and dismounting the connectors.

It should be noted that this type of structures may prove interesting when the spillway width is rather short (10-15m).

La structure de la partie souterraine du système frigorifique utilisé pour l'évacuateur du barrage de Sitikanskaïa (Fig. 8c) est semblable à celle décrite ci-dessus. La partie supérieure du système frigorifique, avec collecteurs de pression et de drainage, est installée dans une galerie située dans le mur de béton du déversoir. Afin de permettre l'inspection et la réparation des colonnes de congélation, il y a un puits d'accès passant au-dessus de chacune de colonne, dans le plafond de la galerie. La préservation des colonnes de congélation est considérablement simplifiée dans ce cas, parce qu'on n'a qu'à refermer les collecteurs de pression et de drainage. Ce système est beaucoup plus fiable que ceux qui doivent assurer la protection de chacune des colonnes.

Les inconvénients de ce système sont une consommation supplémentaire de béton pour construire des murs de déversoir relativement petits, leur structure complexe et les coûts de main d'œuvre pour garder la galerie sèche.

Les systèmes à circulation naturelle de frigorigène liquide (saumure, kérosène, etc.) sont plus fiables. On a utilisé ces systèmes pour la création d'un bouclier de glace auxiliaire dans les sols dégelés de la base du barrage de Sitikanskaïa, ainsi que pour la reconstruction du déversoir de la centrale d'Irelyakski, avec la création d'une cavité horizontale dans le mur du déversoir, formée par la surface de l'échangeur de chaleur extérieur (Fig. 8d). En fait, cet ouvrage est équipé d'un système frigorifique à liquide et d'un échangeur de chaleur annulaire, et la partie souterraine est pourvue d'une garniture de béton qui sert de mur au déversoir.

Une comparaison des paramètres techniques et économiques des deux systèmes de murs de déversoir examinés ci-dessus a montré que :

1. si on utilise des systèmes à frigorigène liquide, les coûts de construction de ces murs sont inférieurs de 40 % parce qu'il faut moins de métal, un plus petit volume de béton et moins de travaux de terrassement.

2. les systèmes à frigorigène liquide peuvent réduire notablement les coûts d'exploitation et la consommation d'énergie. Par rapport aux systèmes à air, il n'est pas nécessaire d'alimenter les colonnes réfrigérantes en air et il n'y a pas de problèmes de colmatage par la glace aux points de condensation de l'humidité de l'air, ce qui améliore la fiabilité du système de congélation.

3. la construction des systèmes à frigorigène liquide est plus complexe que celle des systèmes à l'air ; en effet, ils doivent être montés avec plus de précision parce qu'on ne peut plus y avoir accès par la suite sans démolir le mur de béton.

Les limites ci-dessus ne s'appliquent pas aux systèmes frigorifiques saisonniers, qui utilisent des frigorigènes (par exemple, l'ammoniac, le propane, le fréon et d'autres agents plus modernes offrant une plus grande sécurité pour l'environnement, comme le khladon 22).

On a créé un bouclier de glace qui joue son rôle prévu depuis plus de douze ans à la centrale thermique d'Anadyrskaiïa [18, 19].

La chaleur est transférée du sol à la surface par le cycle thermodynamique des changements de phase du frigorigène.

Lorsque la température de l'air diminue en automne et en hiver, la vapeur du frigorigène se condense dans la partie supérieure de la thermopile (condenseur) et

The structure of the underground part of the refrigerating system of the spillway of Sitikanskaya dam (Fig. 8c) is similar to the one mentioned above. The upper part of the refrigerating system with pressure and outlet collectors is installed in a gallery located in the concrete spilling wall. To provide the possibility of inspection and repair of the freezing columns, there are manholes above each column in the gallery ceiling. The conservation of the freezing columns is considerably simplified in this case, because it is only necessary to close the pressure and outlet collectors. The reliability of such a system is much higher than in the case when each column is preserved separately.

The drawback of this system is the additional consumption of concrete for rather small water spilling walls, their complicated structure and the labor costs associated with keeping the gallery dry.

Liquid systems with the natural circulation of a cooling agent (brine, kerosene, etc.) are more reliable. Such systems were used in the creation of an auxiliary frozen shield in the underbed thawed soils at Sitikanskaya dam and during the spillway reconstruction of Irelyakski hydro project with the creation of an horizontal cavity in the water spilling wall which is the surface of the outside heat exchanger (Fig. 8d). In fact, this structure is equipped with a liquid refrigerating system and an annular heat exchanger, the underground part being lined with concrete and used as a water spillway wall.

A comparison of technical and economical parameters of the two systems of spillway walls discussed above has shown that:

1. when liquid systems are applied, the construction costs of the water spillway wall are 40% lower due to metal saving and a smaller volume of concrete and earthwork.

2. liquid systems can significantly reduce operational costs and power consumption. Compared to air systems, there is no need to supply air to the refrigerating columns and there is no plugging with ice at the points of air moisture condensation, which improves reliability of the freezing system.

3. liquid systems are more complicated in manufacturing than air ones, requiring more accurate mounting because there is no access to them later on without considering the destruction of a concrete wall.

Seasonal refrigerating systems use cooling agents (ammonia, propane, freon and more modern environmental safe agents such as khladon 22 and others) and are free of the limitations mentioned above.

A freezing shield was created and has been successfully operating over 12 years at Anadyrskaya thermal power project [18, 19].

The heat transfer from the soil to the surface is due to thermodynamic cycles of the cooling agent, which undergoes phase transformations.

When the air temperature decreases in the autumn-winter period, the cooling agent vapor condenses in the upper part of the thermopile (condenser) and flows

le liquide s'écoule le long des parois. Dans la partie inférieure de la thermopile (évaporateur), le condensat est évaporé par la chaleur du sol et la vapeur s'élève jusqu'à la zone de condensation, où le cycle se répète.

En été, lorsque la température de l'air est supérieure à celle du sol, la condensation s'arrête et la thermopile cesse de fonctionner automatiquement.

Le principal avantage de ce système est un processus d'échange de chaleur plus intensif.

On détermine la distance entre les pieux selon les conditions climatiques et le diamètre des cylindres de sol glacé, suite à une analyse technique.

3.4. INFLUENCE DES CONDITIONS GÉOCRYOLOGIQUES SUR LA CONCEPTION ET L'IMPLANTATION

La conception des projets hydroélectriques comporte habituellement plusieurs étapes. Pendant chacune d'elles, les conditions techniques et géocryologiques ont une influence significative sur les diverses solutions retenues [11, 16].

Au cours de l'étape de la sélection du site, il faut prendre en compte la répartition des types de pergélisol (continu, insulaire, etc.), les zones dégelées dans les vallées fluviales, ainsi que la présence et la probabilité de phénomènes cryogéodynamiques.

Toutes ces questions deviennent plus significatives au cours des étapes ultérieures de la conception. Par exemple, pour la construction de la CH de Viluiskaïa, on a examiné deux sites, ceux d'Ust-Botuobinsky et d'Erbeieksky.

Sur le site d'Ust-Botuobinsky, les pentes et le fond de la vallée sont constitués en très grande partie de marne du cambrien saturée de glace (avec une teneur volumétrique en glace pouvant atteindre 10 %), soulevée par le processus de cryogenèse. Une zone de talik s'est développée sous le lit du cours d'eau, où une épaisseur de sol dégelé de 50 m est en train de regeler à une température de 0°C, obtenue par la circulation de solutions salines à l'intérieur de cette zone. Les marnes étaient transformées en argiles dans une zone d'altération intensive de 10 m d'épaisseur, dans le lit du cours d'eau.

La transformation de la roche sur les versants de la vallée était influencée par les nombreux changements dus à l'alternance du gel et du dégel à long terme, accompagnés par divers processus de transformation du lit du voisinage (déchargement de matériaux, glissements de terrain, coulées de solifluxion diluviales et sédimentation). Ces phénomènes ont créé une zone de plus de 20 m d'épaisseur de loam et d'argile avec des blocs rocheux orientés au hasard, des pierres, des marnes relativement bien préservées, des calcaires et des dolomites. Le sol, saturé de glace et soulevé, a une teneur en glace comprise entre 10 et 20 %. Selon les prévisions du dégel causé par l'exploitation de la centrale, on pourrait observer des tassements irréguliers des matériaux terreux, ainsi qu'une forte augmentation de leur déformabilité et une réduction de leur résistance.

Les versants et le fond de la vallée du site d'Erbeieksky sont formés de roches trappéennes intrusives du triasique. Selon les données géophysiques, dans la partie

down as a liquid along the walls. In the lower part of the thermopile (evaporator), the condensate is evaporated by the heat of the soil and the vapor rises up to the condensation area where the cycle is repeated.

In summer, when the air temperature is higher than the soil temperature, the condensation is stopped and the thermopile operation is terminated automatically.

The main advantage of such a system is a more intensive process of heat exchange.

The distance between the piles is set dependent on climatic conditions and the diameter of the icy-soil cylinders determined by an engineering analysis.

3.4. INFLUENCE OF GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS ON THE DESIGN AND LAYOUT SOLUTIONS

The design of hydropower projects is usually performed in several stages. During each stage, engineering-geocryological conditions have a significant influence on the design solutions [11, 16].

Distribution of permafrost parameters (continuous, insular, etc.), thawed zones in river valleys, presence and probability of cryogeodynamic phenomena shall all be taken into account at the stage of site selection.

All these questions become more significant at the latter stages of the design. For the construction of Vilujskaya HPP, two locations were considered: Ust-Botuobinsky and Erbeyeksky.

The major part of the slopes and the bottom of the valley at Ust-Botuobinsky site consisted mostly of Cambrian marl ice saturated (with a volumetric ice content up to 10%) and heaved by the cryogenesis process. A talik zone had developed under the riverbed where a thawed soil 50 m thick is gradually transforming in a frozen state with a temperature of 0°C by circulation of saline solutions inside that zone. Marls were transformed into clays in a 10 m thick zone of intensive weathering in the riverbed.

The rock transformation on the valley sides was influenced by the multiple changes of long term freezing and thawing accompanied by processes of riverbed formation with nearby unloading, sliding, deluvial solifluction drift and sedimentation. As a result, there is a zone over 20 m thick of loam and clay with randomly oriented blocks, stones, relatively preserved marls, limestones and dolomites. The soil is ice saturated and heaved, the ice content varying from 10 to 20%. According to predictions of thawing resulting from power plant operation, the soils could show irregular settlements, a sharp increase in deformability and a reduction of strength.

The sides and the bottom of the valley at the Erbeyekskiy site are composed of a trappean intrusion rock of triassic age. According to geophysical data, the

de vallée formée par le lit du cours d'eau, l'épaisseur de cette intrusion est supérieure à 200 m. Elle est constituée par des dolérites avec quelques joints et un peu de glace; la teneur en glace à l'extérieur des zones altérées et des zones d'écoulement ne dépasse pas 1 %. Dans la plus grande partie du massif, les fissures ne contiennent pas de glace et les dolérites gelées sont pratiquement sèches. Le grand nombre de joints et la forte teneur en glace sont typiques de zones d'altération de 8 à 15 m d'épaisseur. Le trapp comporte des xénolites d'argiles sableuses carbonées, entourées de dolérites aphanitiques à fissures saturées de glace, qui comportent un grand nombre de joints.

À cause des caractéristiques particulières de la composition et des joints, on observait divers degrés de saturation d'eau de la roche avant le gel. À cause de leur plus grande conductivité thermique, les dolérites gelaient plus rapidement que les roches sédimentaires. L'eau des joints des dolérites, expulsée par la zone de gel, augmentait la teneur en eau de la xénolite. Ainsi, le gel de la xénolite se produisait dans un système fermé causant des conditions de saturation en glace et de soulèvement [11, 12].

Après une comparaison des conditions techniques et géocryologiques des deux sites, les ingénieurs étaient d'avis que les conditions du site d'Erbeieksky étaient les plus favorables [9].

Lors de l'étude du site de la CH de Mokskaïa, sur la rivière Vitim, on a rejeté le choix d'un site plus favorable du point de vue topographique et hydrologique à cause de couches rocheuses étendues de plus de 15 m d'épaisseur qui se sont formées sur les pentes de la vallée, et dont on prévoyait le déplacement pendant la période de la construction, et à cause de changements des conditions thermodynamiques pendant l'exploitation.

De plus, ce type de barrage est fortement influencé par les conditions techniques et géocryologiques.

Les barrages de type gelé devraient être construits de préférence sur des sites où le dégel peut dégrader fortement les caractéristiques du sol (déformation, résistance, percolation), ainsi que sur des sites à sols sableux et argileux caractérisés par un englacement non uniforme excessif et par de fréquentes accumulations de grandes quantités de glace souterraine.

La construction de ces barrages semble raisonnable dans les régions de pergélisol continu, notamment sur les cours d'eau à taliks étroits et fermés. Dans ces cas, les passages d'eau contournent habituellement le corps du barrage. On a utilisé ce modèle pour la construction des barrages des rivières Irelyakh, Myaundja [5, 22] et Satikan [5, 6].

Si le pergélisol forme un ou plusieurs îlots, les barrages de type dégelés sont préférables. C'est aussi le cas si l'épaisseur des sols à forte teneur en glace est peu importante, et s'ils reposent sur une couche de sols imperméables non soulevés à faible teneur en glace, et dont le dégel ne devrait pas causer de tassements et de percolations significatifs. Dans le cas contraire, on doit connecter des ouvrages anti-percolation (bouclier, diaphragme, noyau) aux matériaux terreux de fondations peu compressibles et imperméables par une tranchée qui passe à travers les sédiments glacés.

thickness of the intrusion in the riverbed part of the valley is over 200 m. The intrusion consists of dolerites with a few joints and little ice, the ice content outside weathered and discharge zones not exceeding 1%. In the major part of the massive, cracks do not contain ice and dolerites are practically dry frozen. Increased jointing and ice content are typical of the weathering zone 8 - 15 m thick. The traprock includes xenolites of carbonaceous sandy clays surrounded by heavily jointed and ice saturated cracks of aphanitic dolerites.

Due to specific features of composition and jointing, the rock was variously saturated before freezing. Dolerites due to their larger heat conductivity were frozen more rapidly than sedimentary rock. The water contained in dolerite joints was squeezed out from the freezing front and added to the water content of xenolite. Thus, xenolite freezing occurred in a closed system leading to ice saturation and heaving [11, 12].

After a comparison of engineering-geocryological conditions of the two sites, the conditions at Erbeyekskiy site were considered as more favorable [9].

When the site for Mokskaya HPP on Vitim River was studied, a more favorable site from a topographical and hydrological point of view was rejected due to the wide development of over 15 m thick stone layers on the valley slopes, which were predicted to move during the construction period and due to changes in thermodynamic conditions during operation.

The dam type is also largely influenced by engineering-geocryological conditions.

Dams of the frozen type should preferably be constructed at sites where thawing can seriously degrade soil parameters (deformation, strength, seepage), as well as at sites with sandy-clayey soils which are characterized by excessive non uniform icing and frequent large accumulation of underground ice.

The construction of such dams appears reasonable in the regions with continuous permafrost, especially on the rivers with narrow and closed taliks. In such cases, the water passages usually bypass the dam body. Such design was applied for the construction of dams on Irelyakh, Myaundzha [5, 22] and Satikan [5, 6] rivers.

When the permafrost is under the form of an island or rare islands, the thawed type of dams is preferred. The thawed type is also preferred if the thickness of soils with a high ice content is not significant, if they are underlaid by impervious soils with a low ice content and non heaved whose thawing would not cause significant settlements and seepage. In this case, anti-seepage structures (shield, diaphragm, core) are connected with a low compressible and impervious foundation soil through a trench cutting across the icy sediments.

Par exemple, les fondations de l'aile droite du barrage d'Ust-Khantaiskaïa reposent sur une couche de sols argileux, partiellement dégelés et saturés d'eau, et partiellement gelés et saturés de glace. Le barrage est du type dégelé, malgré le fait qu'il reste une partie des argiles saturées de glace dans ses fondations.

Dans certaines conditions techniques et géocryologiques, on peut approuver la construction d'un barrage de type gelé, même dans ces cas. Si, après le dégel, on prévoit une perméabilité élevée du sol des fondations, ainsi que des tassements irréguliers significatifs, alors, un barrage de type gelé peut être préférable. On opte pour le gel artificiel des zones de talik et du corps du barrage à l'aide de systèmes frigorifiques saisonniers. Par exemple, on a installé des systèmes frigorifiques à l'air aux barrages de Irelyakh, de Pevek, de Satikan, etc. [5, 6], et un système vapeur-liquide à la CT d'Anadyrskaiïa [18].

Les caractéristiques spécifiques de la conception des installations hydroélectriques sont également déterminées par les conditions techniques et géocryologiques.

Les barrages de type gelé comportent deux zones : une zone gelée, notamment la partie centrale et le massif de recharge aval, et une zone dégelée, notamment le massif de recharge amont et une partie de ses fondations. Habituellement, les barrages à noyau gelé ne comportent ni réseau de drainage, ni filtres, ni zones de transition.

Pour réduire la déformation du massif de recharge amont du barrage à noyau gelé pendant le dégel, on construit un massif amont à très faible pente et, dans certains cas, on lui rajoute une berme supplémentaire (barrage d'Irelyakh).

De préférence, le massif de recharge amont est fait de sols à grains grossiers sans cohésion, qui sont moins sujets aux tassements irréguliers pendant le dégel ; ce critère est utilisé pour la conception des fondations du massif de recharge amont.

Par exemple, il a été proposé que les loams silteux à forte teneur en glace (d'une teneur volumétrique en glace supérieure à 60 %), contenant des veines de glace dans les fondations du massif de recharge amont d'un barrage à noyau gelé sur la rivière Taata, en Yakoutie centrale, soient remplacés par un sol dégelé de même composition lithologique sur une profondeur de 6 m, dans cette partie du barrage [19]. Pour assurer la stabilité de la culée sur la rive gauche, composée de types de sols semblables coupés par un réseau de veines de glace en forme de coin d'une épaisseur pouvant atteindre 25 m, on a choisi un gravier sableux comme matériau de remplissage. Ce dernier devait servir d'isolant thermique et protéger le sol du dégel dû au remplissage du réservoir le long de la rive gauche, ainsi qu'à compenser des tassements irréguliers et significatifs dus au dégel. On avait prévu la construction d'un bouclier de glace à travers le barrage en matériaux meubles, qui se trouvait à prolonger le rideau gelé le long du barrage [9].

Les ouvrages où l'eau passe sont des sources de chaleur, c'est pourquoi ils devraient être situés de préférence à l'extérieur des barrages et des culées dans tous les cas, sauf pour les barrages construits sur des couches rocheuses à faible teneur en glace. Le percolation autour et dans les fondations de ces ouvrages entraîne le développement de zones de talik ou de zones dégelées qui s'agrandissent en direction du barrage et qui peuvent contribuer à réduire sa stabilité. Il faut prendre des mesures spéciales pour réduire la taille de la zone dégelée (ou, du moins, pour la

For example, the foundation of the right wing of Ust-Khantaiskaya dam is resting on a layer of clayey soils, partially thawed and saturated and partially frozen and ice saturated. The dam is of the thawed type despite the fact that ice saturated clays are partially left in the foundation.

For some engineering-geocryological conditions, a frozen type of dam may be approved even in those cases. If after thawing, a high permeability of the foundation soil is predicted as well as significant irregular settlements, then a frozen type of dam could be preferable. Artificial freezing of the talik zones and the dam body are chosen using seasonal refrigerating systems. For examples: air systems are installed on Irelyakh, Pevek, Satikan dams, etc. [5, 6], and a vapour-liquid system is installed at Anadyrskaya TPP [18].

Specific design features of hydropower structures are also determined by engineering-geocryological conditions.

Dams of the frozen type have two zones: a frozen one including the central part and the downstream shell and a thawed one including the upstream shell and a part of its foundation. No drainage, filters and transition zones are commonly provided for frozen type dams.

To reduce deformation of the upstream shell of the frozen type dam during thawing, the upstream slope is constructed rather flat and in some cases an additional berm is added (Irelyakh dam).

The upstream shell is preferably constructed of cohesionless coarse grained soils less susceptible to irregular settlements during thawing. This criterion is applied for the design of the upstream shell foundation.

For example, it was proposed that the silty loams with a large ice content (volumetric ice content over 60%), containing wedge ice inclusions in the foundation of the upstream shell of a frozen type dam on Taata River in central Yakutia, be replaced by a thawed soil of the same lithological composition for a 6 m depth in that part of the dam [19]. To provide reliability of the abutment on the left bank composed of similar soils intersected by a network of wedge shaped ice veins up to 25 m thick, a sandy-gravel fill was chosen. The fill was to serve as a heat insulator and to prevent the soil from active thawing along the left bank caused by the reservoir filling and at the same time to compensate for the significant and irregular settlements caused by thawing. They were planning to construct a frozen shield across the fill dam, which was a continuation of the frozen curtain along the dam [9].

Water passing structures are heat sources. That is why they should preferably be located outside dams and abutments in all cases except where the dams are built on rock with a low ice content. Seepage around and in the foundation of such structures leads to the development of talik zones or thawed zones which expand towards the dam and can lead to a decrease of its stability. To reduce the size of the thawed zone or at least for its limitation, special measures shall be taken. For 2-3 years, a thawed zone had developed under the spillway structure on Irelyakh

limiter). Au cours d'une période de deux ou trois années, une zone dégelée s'était développée sous la structure du déversoir sur la rivière Irelyakh, et il a fallu installer un système frigorifique le long des bords du passage d'eau et prendre d'autres mesures pour empêcher son expansion.

Dans le cas des barrages bas à bouclier de glace anti-percolation, on peut également construire les passages d'eau dans le corps du barrage. Dans ce cas, il faut construire sous l'ouvrage des galeries à ventilation forcée pourvues de systèmes frigorifiques capables d'assurer des températures négatives dans les fondations. Ces galeries doivent être fermées hermétiquement en l'été [27, 39].

Au moment de leur implantation, les ouvrages de béton (prise d'eau, exutoire, etc.) doivent être situés à l'intérieur des zones dégelées ou des zones de sédiments à faible teneur en glace, à des endroits où ils ne seront pas déformés par le dégel des fondations. Ainsi, dans le cas de la CH de Viluiskaïa-I, on a combiné les canaux d'entrée desservant la centrale électrique et le déversoir afin de pouvoir les construire à l'extérieur des zones de xénolite décrites ci-dessus, ainsi que pour empêcher des tassements inadmissibles touchant les structures [19].

Comme le complexe souterrain de la CH de Khantayskaïa est situé dans les dolérites dégelées d'une intrusion trappéenne, il n'y avait pas de problèmes dus aux conditions dynamiques de gel pendant l'exploitation. Toutefois, on n'observe que très rarement des conditions aussi favorables. Habituellement, on doit utiliser des critères différents pour construire les diverses parties d'une centrale hydroélectrique.

La complexité des conditions géocryologiques à certains sites du barrage rend nécessaires des exigences spéciales pendant la conception des mesures anti-percolation.

Le régime thermique des dispositifs anti-percolation en matériaux terreux est influencé par la chaleur dégagée par le réservoir en amont et par le refroidissement par l'air du côté aval. Ces dispositifs doivent être construits entièrement dans une zone dégelée. On choisit l'angle optimal entre les parties imperméables du barrage et les fondations en fonction des résultats de l'analyse thermique.

Lorsqu'on construit sur des sols de type sable-argile saturés de glace typiques des vallées fluviales, l'un des problèmes le plus importants est la connexion entre l'ouvrage et ses fondations et culées. Pour construire un dispositif anti-percolation, on crée habituellement un bouclier de glace continu dans le corps du barrage et on le relie aux sols gelés des fondations et des culées. Dans les cas de faibles percolations et avec des matériaux terreux des fondations imperméables peu déformables et résistant à la suffosion (notamment ceux utilisés pour remplir les fissures), on peut construire des rideaux en même temps que le sol des fondations dégèle, ce qui réduit le temps de construction. À cause de la faible teneur en glace et du petit nombre de joints dans les dolérites des fondations de la CH de Viluiskaïa-I, on a estimé que la perméabilité des roches après le dégel était inférieure à 1 m/jour. Pour en tenir compte, on a réalisé la connexion et les injections en profondeur dans les dolérites à partir d'une galerie creusée dans les fondations du barrage, pendant la période de dégel du sol et d'exploitation de la centrale [37].

Si la roche a un nombre important de joints et une forte teneur en glace, la vitesse de percolation peut augmenter à des pressions supérieures et causer l'érosion

river and only the presence of a refrigerating system along the bank of the water passage and some other measures prevented it from expansion.

For low dams with a frozen shield as an anti-seepage component, water passages can be constructed in the dam body as well. In this case, galleries with forced ventilation equipped with refrigerating systems able to provide negative temperatures in the foundation shall be constructed under the structure. The galleries shall be hermetically closed during summer [27, 39].

At the time of structural layout, concrete structures (water intake, outlet, etc.) shall be located within thawed zones or zones with low ice containing sediments, where they will not be deformed by foundation thawing. Thus inlet channels for the powerhouse and the spillway of Viluiskaya HPP-I were combined and so it was possible to locate these structures outside the xenolite zones mentioned above and prevent inadmissible settlements of the structure [19].

The underground complex of Khantayskaya HPP is located in the thawed dolerites of a trappean intrusion and so there was no problem caused by dynamic freezing conditions on the operation. However such conditions are met quite rarely. So various parts of an hydropower project are usually constructed using different criteria.

The complexity of geocryological conditions at certain dam sites imposes special requirements to the design of anti-seepage measures.

The thermal regime of soil anti-seepage components is formed under the heating influence of the reservoir on the upstream side and the cooling influence of air from the downstream side. Such components shall be constructed completely in a thawed zone. The optimal angle between the impervious part of the dam and the foundation is chosen according to the thermal analysis results.

When the construction is carried out on ice saturated sandy-clay soils typical of river valleys, one of the most important problem is the connection between the structure and its foundation and abutments. To create an anti-seepage component, continuous frozen shields in the dam body are usually built and connected to the frozen soils of the foundation and abutments. In cases of low seepage losses, not too deformable and suffusion resistant foundation soils (in particular crack filling), impervious curtains can be constructed simultaneously with the thawing of the foundation soil, so reducing the construction time. Due to the low ice content and the few joints in the dolerites of Vilujskaya HPP-I foundation, the rock permeability after thawing was assessed to be less than 1 m/day. Based on that assessment, the connection and the deep grouting of dolerites was carried out from a gallery in the dam foundation during plant operation and soil thawing [37].

When there is significant jointing and ice content in the rock, the seepage rate can increase with higher water pressures causing a washout of crack filling and make

des matières de remplissage des fissures, ce qui rend difficile la construction d'un rideau d'injections après le remplissage du réservoir. Dans ces conditions, la solution la plus raisonnable peut être d'installer le rideau d'injections dans les fondations, après le premier dégel, avant la construction de la centrale. Tel était le plan adopté pour la CH de Kolymaskaïa, dont les granites étaient jugés très perméables après le dégel [4, 9].

L'observation des barrages en enrochement montre que les massifs de recharge aval et les zones dégelées de leurs fondations gèlent assez rapidement. On a observé ce phénomène à la CH de Viluiskaïa-I après le premier cycle d'injections en profondeur [3], ainsi qu'à la CH d'Ust-Khantaiskaïa et à celle de Kolymaskaïa (Fig. 9). Ainsi, dans des conditions techniques et géocryologiques définies et pour certains types d'ouvrages, on peut installer des dispositifs anti-percolation spéciaux et réduire l'ampleur des travaux d'injection de coulis requis. Si, après le dégel, les fondations ne sont que faiblement perméables, il se peut qu'il ne soit pas nécessaire de construire ces dispositifs.

Les conditions techniques et géocryologiques déterminent le choix des solutions, pendant la conception, pour les divers ouvrages d'un projet hydroélectrique. Par exemple, on a examiné deux types de prise d'eau à la CH de Viluiskaïa-II. Le premier faisait appel à la construction de tunnels et le deuxième, à l'installation de conduites forcées de métal ou de béton en surface. Le meilleur choix, du point de vue des travaux d'excavation avec des explosifs, était le premier, étant donné que l'installation des conduites forcées en surface nécessitait des mesures de protection spéciales pour les ouvrages construits au cours de la première phase des travaux. Par la suite, on a constaté que les dolérites à l'emplacement des tunnels de prise d'eau comportaient un grand nombre de joints et que leurs fissures étaient saturées de glace, ce qui pouvait causer une forte réduction de leur résistance pendant le dégel et ainsi, diminuer la stabilité de la roche. On a donc choisi le modèle à conduites forcées en surface [9].

Pendant la construction de la CH de Viluiskaïa-I, la salle des machines était située dans des dolérites saturées de glace à joints et, quand les pentes de la tranchée ouverte dégelaient, il fallait niveler la pente afin de mettre en place une quantité supplémentaire de béton et d'installer un système de drainage pour réduire la contre-pression. On a tenu compte de cette contreperformance lors de la conception des CH d'Ust-Khantaiskaïa et de Kolymaskaïa, dont les salles des machines sont souterraines.

La dynamique des conditions de gel a influencé les caractéristiques de conception de la salle des machines de la CH de Kolymaskaïa, qui était située à l'intérieur d'une intrusion de granites de type biotite, avec des concentrations locales de xénolites de roches sédimentaires et intrusives. Les granites étaient notablement transformés par des processus endogènes (tectoniques) et exogènes (cryogéniques). L'état de contrainte du massif rocheux et ses propriétés variaient selon le type de nappe phréatique, la vitesse du gel et de l'emplacement de l'exutoire d'eau par rapport au front de gel. Les granites des versants de la vallée situés à environ 200 m au-dessus du lit du cours d'eau étaient gelés dans les conditions atmosphériques prévalentes, et un grand nombre de fissures de ces roches étaient vides. Sous le niveau du gel des granites et dans des conditions de saturation en eau, les fissures étaient remplies de glace. Au fond de la vallée, sous

difficult the construction of a grout curtain after reservoir filling. Under these conditions, a rational solution may be to install the grout curtain in the foundation after preliminary thawing and before construction of the powerplant. Such a scheme was adopted for Kolymenskaya HPP, where granites were evaluated as very pervious after thawing [4, 9].

Observation of rockfill dams shows that the downstream shells and the thawed zones in their foundation are frozen rather fast. This phenomena was observed on Viluiskaya HPP-I after the first cycle of deep grouting [3], at Ust-Khantajskaya HPP and Kolymenskaya (Fig. 9). Thus, under definite engineering-geocryological conditions and for definite types of structures, special anti-seepage components can be installed and reduce the volume of grouting work required. If the foundation after thawing is weakly pervious, it may not be necessary to use them.

Engineering geocryological conditions determine the choice of design solutions for the separate structures of an hydropower project. For example, two water intake variants were considered at Vilujskaya HPP-II: the first one involving the construction of tunnels and the second the installation of metal or concrete penstocks on the surface. The best alternative from the point of view of explosive works was the first one, since rock excavation for the surface penstocks required special protective measures for the structures of the first phase of construction. Later, it was found that the dolerites at the location of the water intake tunnels were highly jointed and ice saturated in cracks, which could lead to a sharp reduction of strength during thawing and as a result lead to a loss of stability in the rock. So, the alternative with surface penstocks was accepted [9].

During the construction of Vilujskaya HPP-I, the machine hall was located in jointed ice saturated dolerites and when the slopes of the open trench thawed, it was necessary to flatten the slope, to place additional concrete and to install a drainage system to reduce the back-pressure. This negative experience was taken into account when designing Ust-Khantajskaya and Kolymenskaya HPP where underground machine halls were installed.

The dynamics of frozen conditions influenced the design features of the machine hall of Kolymenskaya HPP, which was located within an intrusion of biotite granites with local pockets of xenolites of sedimentary and intrusive rock. Granites were significantly transformed by endogenic (tectonic) and exogenic (cryogenic) processes. The stress state of the rock massive and its properties varied, depending on the water table, the rate of freezing and the water outlet from the freezing front. Granites on the sides of the valley located about 200 m above the riverbed were frozen in air conditions and a large number of cracks were empty in that rock. Below that level where the granites were frozen under water saturated conditions, the cracks were filled with ice. In the bottom of the valley under terraces where the riverbed thawed zones were previously located, the cracks were filled with saturated sandy-clay materials with ice streaks. The process of cryogenic desintegration

les terrasses recouvrant les zones dégelées du lit, les fissures étaient remplies de matériaux saturés de type sable-argile, avec des filons de glace. Le processus de désintégration cryogénique a intensifié des changements secondaires dans les granites le long des fissures, et il a contribué au développement de micro-joints réduisant de façon significative la résistance du granite. Ce résultat était plus évident dans les zones de gel et de dégel répétés, notamment dans la zone d'altération en surface et sous les terrasses, à l'intérieur des zones tectoniques.

Lors de la conception de la salle des machines souterraines dans des granites saturés de glace, on a pris des mesures spéciales contre les inondations causées par le percolation à travers les fissures, pendant la fonte des glaces. On a mis au point un système de drainage spécial constitué de deux niveaux de galeries autour de la salle des machines, dont le drainage était assuré par des trous forés. Les parois de la salle des machines souterraine ont été renforcées avec du béton projeté [19].

Au cours de la conception des ouvrages temporaires destinés au passage de l'écoulement d'eau pendant la construction, on prévoyait le creusage d'un ponceau, en forme de tranchée recouverte d'une arche de béton reposant sur le granite gelé, formant les murs de la tranchée.

Toutefois, l'analyse des conditions techniques et géocryologiques prévoyait une forte détérioration des propriétés mécaniques du granite pendant le dégel. On a donc modifié en conséquence le modèle structural ; il a été suggéré de poser un revêtement de béton tout le long de la tranchée, de manière à former une structure faisant corps avec l'arche de béton [19].

intensified secondary changes in granites along the cracks and contributed to the development of micro-jointing leading to a significant decrease in the granite strength. The result was mostly evident in areas where freezing was repeatedly interchanged to thawing, particularly in the zone of surface weathering and under terraces within the tectonic zones.

When the underground machine hall was designed in ice saturated granites, special measures were taken to prevent against flooding caused by seepage through cracks during ice thawing. A special drainage system was developed consisting of two levels of galleries around the machine hall, where drainage boreholes had been arranged. The walls of the underground machine hall were reinforced with shotcrete [19].

When designing the temporary structures for passing the river flow during construction, it was anticipated to dig a water culvert as a trench covered with a concrete arch on frozen granite that could serve as the trench walls.

But, the analysis of engineering-geocryological conditions predicted a sharp deterioration of the granite mechanical properties during thawing. As a result, the structural design was revised and a concrete coating was suggested all along the trench contour forming a unit structure with the concrete arch [19].

4. TRAITEMENT DES FONDATIONS ET PASSAGE DES EAUX ET DES GLACES DÉTOURNÉES

4.1. TRAITEMENT DES FONDATIONS

Parfois, il n'était pas possible d'installer un bouclier de glace continu à l'intérieur du corps des barrages de type gelé (ou dans leurs fondations) pendant une seule saison. En même temps, il fallait souvent remonter le niveau du réservoir avant que le bouclier de glace ne soit terminé, soit parce qu'il n'était pas fermé ou parce qu'un régime de température stable n'avait pas été atteint. Cette solution n'est praticable que si, après leur dégel, les sols ont une faible perméabilité et une faible déformabilité. La présence de zones de sols dégelés et non gelés dans le corps ou dans les fondations d'un barrage pourrait favoriser le développement d'une percolation menaçant la sécurité de l'ouvrage.

Une comparaison technico-économique des différents modèles de barrage montre qu'il est possible, dans certaines conditions, de choisir une solution combinant l'utilisation de sols gelés et dégelés dans une assise structurale, sans effets négatifs. Alors, ce type de barrage est intéressant sur le plan économique.

On peut combiner ces deux méthodes de construction pour différentes parties du barrage dans les deux directions (latéralement ou verticalement). Une condition préalable pour l'utilisation de ce type de barrage mixte est une bonne stabilité statique et une bonne résistance au percolation de la zone de contact entre les zones gelées et dégelées dans le barrage et ses fondations, même dans des conditions de variation saisonnière maximale de l'isotherme de zéro. Le gel et le dégel du sol aux zones d'interface ne doivent pas mettre en danger sa stabilité générale et locale.

Une façon fiable de relier le noyau dégelé et l'assise gelée est l'utilisation de galeries d'inspection en béton armé, qui servent à assurer le gel des fondations et leur conservation dans cet état. Les zones de gel des fondations le long du site du barrage peuvent être isolées des zones de sols dégelés par des rideaux d'injections et de matériaux gelés renforcés, installés dans des zones de fondations dont les conditions de dégel et d'injection de coulis ont déjà été établies [3, 27, 31, 39].

Habituellement, la stabilité de l'ouvrage n'est pas touchée par la variation saisonnière de l'isotherme de zéro à l'intérieur du corps de béton et des sols pré-renforcés séparant les zones gelées et dégelées du barrage et de ses fondations.

La Fig. 10 illustre un barrage utilisant les principes de l'utilisation de matériaux terreux pour les fondations à l'état gelé et non gelé [5].

Le barrage en enrochement a un noyau constitué d'une feuille de polyéthylène et d'un loam de moraine. La partie imperméable du barrage repose sur une galerie d'inspection en béton armé d'une section transversale de 3,5 x 3,5 m sur les culées, et de 3,5 x 5 m dans la partie du lit construite sur les fondations.

4. FOUNDATION TREATMENT AND PASSING OF DIVERSION FLOW AND ICE

4.1. FOUNDATION TREATMENT

Sometimes it is not possible to install a continuous frozen shield inside the body or in the foundation of dams of the frozen type in one season. At the same time, there are frequent cases when it is necessary to raise the reservoir before the frozen shield is finished, either because it is not closed or because a stable temperature regime has not been reached. That is practicable only when the soils after thawing have a low permeability and a low deformability. The presence of thawed soils and non-freezing zones in the body or in the foundation of a dam could allow the development of seepage that will threaten the safety of the structure.

The technico-economic comparison of different dam design alternatives has indicated that it is possible, under certain conditions, to develop a solution combining the use of the frozen and thawed soils in one structural foundation without negative consequences. The structure of the dam in this case will be economically efficient.

A combination of the two methods of construction for different parts of the dam can be applied in the two directions either laterally or vertically. Static and seepage stability of the contact between the thawed and frozen zones in the dam and its foundation are the compulsory condition of using this type of mixed dam, even under the maximum seasonal variation of the zero isotherm. Thawing and freezing of soil at the interface zones shall not endanger its general and local stability.

Inspection galleries with reinforced concrete openings that can be used to provide freezing of the foundation and keeping it in a frozen state are the reliable way to link together the thawed core and the frozen foundation. The frozen zones of the foundation along the damsite can be separated from the thawed soils zones by reinforced frozen-grout curtains installed in those foundation zones where thawing and grouting conditions were previously anticipated [3, 27, 31, 39].

The reliability of the structure is usually not influenced by the seasonal variation of the zero isotherm inside the concrete body and prestrengthened soils dividing the frozen and thawed zones of the dams and their foundation.

A dam where the principles of using the foundation soils in both frozen and unfrozen states is shown on Fig. 10 [5].

The rockfill dam has a core consisting of a polyethylene sheet and a moraine loam. The impervious part of the dam lies over a reinforced concrete inspection gallery with a cross section of 3.5 m x 3.5 m on the abutments and 3.5 m x 5 m in the riverbed part built on the foundation.

Les fondations du barrage reposent sur le pergélisol, à l'exception de la zone de talik sous le lit du cours d'eau, d'une largeur d'environ 180 à 200 m. La culée de la rive gauche est composée de basalte fissuré (à une température de $-3,5^{\circ}$ à -4°C), alors que celle de la rive droite est constituée de loams glaciaires, de loams sableuses et de sables à diverses teneurs en glace et caractéristiques de compressibilité à l'état dégelé. La température du sol est de -6°C et près du talik du lit du cours d'eau, de $-0,5^{\circ}$ à -1°C . L'épaisseur des sols glacés sur la culée de la rive droite est de près de 28 m. Ils reposent sur du basalte gelé fortement fissuré. Dans certaines zones, la perméabilité de la roche peut atteindre les 1 000 m/jour.

Pour réduire le coût du traitement des fondations, on a proposé de garder congelés les matériaux terreux des culées et de renforcer le talik du lit du cours d'eau par l'injection de coulis en profondeur. L'interface entre le bouclier de glace et le rideau d'injections était pourvue d'un système de congélation le long de la limite du talik du lit.

Les travaux d'injection de coulis et de réparation se sont poursuivis sans interruption jusqu'à la galerie d'inspection. En plus d'injecter du coulis, on a foré des trous et installé en même temps le système frigorifique sur les culées des rives. Ce système frigorifique installé dans une galerie est idéal, car il assure aussi une connexion sécuritaire entre le noyau dégelé et les fondations pendant les variations saisonnières de l'isotherme de zéro.

Le modèle de l'interface gel-injections sur la rive droite (Fig. 10c) prévoit un rideau d'injections en profondeur de 30 m (deux rangs d'injections en profondeur et une interface profonde d'injection de coulis plus courte, de 18 m) et trois rangs de trous de mine gelés, le long de la limite des sols dégelés, espacés de 1,5 à 2,0 m.

La zone d'interface gel-injections en forme d'éperon forme une nouvelle zone le long des limites du talik après l'injection de coulis. On l'a combinée aux systèmes de congélation longitudinaux afin de prévenir l'expansion des limites du talik. Par injection d'air froid dans la galerie à l'aide de puissants ventilateurs. La Fig. 10 présente les variations de température dans les fondations du barrage après le premier cycle de gel.

Le batardeau de la CH de Kolymaskaïa a été construit sur le lit du cours d'eau, qui repose sur un dépôt alluvial de 2 à 8 m d'épaisseur, d'une perméabilité de 30 à 100 m/jour. Ce dépôt repose lui-même sur des granites fissurés d'une perméabilité de 10 m/jour dans la couche supérieure de 10 m. La perméabilité tend à diminuer avec la profondeur. La largeur de cette zone de talik ouvert est de 110 m.

Le traitement des fondations prévoit l'installation d'un rideau d'injections à deux rangs à travers le talik du lit. On a recouvert de coulis de béton l'ensemble des fondations (matériaux terreux de remplissage, sols alluviaux et roche) jusqu'à une profondeur de 20 m. Sur les rives, on a pratiqué l'excavation sur toute la largeur du noyau. Ensuite, on a procédé à un nettoyage manuel et on a recouvert les zones fissurées de coulis sur une largeur de 10 à 12 m [7, 11].

On a utilisé une technologie spéciale de traitement des fondations pour les barrages de 33 et de 11 m de hauteur construits pour la CH d'Ust-Khantayskaïa dans des dépressions sur les rives gauche et droite de la rivière (Fig. 11). Ces barrages reposent sur des matériaux dégelés (argiles, loams silteuses, loams sableuses provenant de lacs glaciaires et de marécages, avec des lentilles de sols

The dam foundation is underlain by permafrost with the exception of the talik under the riverbed which is about 180-200 m wide. The left bank abutment is composed of broken basalt (temperature – 3.5° to – 4°C); the right bank consists of glacial loams, sandy loams and sands that have various ice contents and collapsibility when thawed. The soil temperature is – 6°C and near the riverbed talik is – 0.5° to – 1°C. The thickness of the icy soils on the right bank abutment approaches 28 m. They are underlain by a strongly fissured frozen basalt. In some zones, the rock permeability may reach 1 000 m/day.

To reduce the cost of foundation treatment, it was proposed to keep the bank abutments soils in a frozen state and to strengthen the riverbed talik by depth grouting. The interface between the frost shield and the grout curtain is equipped with a freezing system along the riverbed talik boundary.

Grouting and repair works proceeded continuously through the inspection gallery. Besides the grouting, boreholes and installation of refrigerating systems on the bank abutments are carried out at the same time. The gallery is an ideal refrigerating system and simultaneously providing a safe connection between the thawed core and the foundation during seasonal shifts of the zero isotherm.

The design of the frost-grouting interface on the right bank (Fig. 10c) includes a 30 m deep grout curtain (two rows of deep grouting and one shorter 18 m deep interface grouting) and three rows of freezing boreholes along the boundary of thawed soils with a 1.5-2.0 m spacing.

The spur type frost-grouting interface zone provides a new zone along the talik boundaries after grouting. Its combination with longitudinal freezing systems intends to prevent the expansion of the talik boundaries by injecting cold air into the gallery with powerful fans. The temperature variation in the dam foundation after the first freezing cycle is shown on Fig. 10d.

Kolymskaya HPP cofferdam was built on the riverbed under which lies an alluvium deposit 2 - 8 m thick characterized by a permeability of 30 - 100 m/day. The alluvium deposit lies on fissured granites with a permeability of 10 m/day in the upper 10 m. The value of permeability tends to decrease with depth. The width of that open talik is 110 m.

The foundation treatment included the installation of a double row grout curtain across the riverbed talik. The whole foundation (soil filling, alluvium soils and rock) was grouted down to a depth of 20 m. On the banks of the river, the excavation was made for the width of the core material. After that, a manual cleaning was done and most fissured zones were grouted for a width of 10 - 12 m [7, 11].

A special technology of foundation treatment was used for 33 and 11 m high dams constructed for the Ust-Khantayskaya HPP project in depressions on the left and right banks of the river (Fig. 11). These dams are underlain by thawed clays, silty loams, sandy loams of lacustrine-glacial and boggy origins with lenses of frozen soils having a massive structure and a thickness from 8 to 15 m. That part of frozen

gelés à structure massive), d'une épaisseur de 8 à 15 m. Cette couche de loam et d'argiles à varves gelées, à structure feuilletée, a été enlevée des fondations. On a installé des pieux de sable pour le drainage afin d'améliorer la capacité portante et les conditions de consolidation. Le traitement des fondations du barrage de la rive droite présentait de sérieuses difficultés à cause de la consistance très molle des dépôts lacustres et marécageux saturés qui dégelèrent. Le traitement des fondations n'est devenu possible qu'après le remplissage du fond de la tranchée avec du gravier et de galets et la mise en place de rails de bois et de métal pour les excavateurs.

L'expérience de la construction du barrage a montré qu'il était préférable d'excaver les sols mous au cours de l'hiver et du printemps. En été, la productivité du matériel d'excavation accuse une forte diminution à cause de glissements occasionnels de terrain le long des pentes et du débit croissant de percolation, qui tendent à liquéfier tous les matériaux, ce qui rend difficile l'excavation [20, 23, 24].

Le principal facteur qui nous aide à déterminer le traitement des fondations rocheuses est la perméabilité dans le massif rocheux pendant le dégel. Ainsi, pendant la construction de la CH de Viluiskaïa I-II, les dolérites dégélées dans les fondations du barrage avaient un coefficient de perméabilité inférieur à 10 m/jour, ce qui permettait d'injecter des coulis dans la roche pendant le remplissage du réservoir et le dégel du massif. Si la perméabilité de la roche et la charge de pression de l'eau sont plus grandes, l'injection de coulis devient plus difficile, et il faut la faire avant le remplissage du réservoir, après un dégel forcé des fondations rocheuses. L'une des méthodes les plus efficaces dans ce cas est le réchauffement de l'assise gelée par la circulation d'eau de surface d'une température voisine de 0,5°C. On a effectué ce type d'injection de coulis pendant la construction de la CH de Kolymaskaïa [14, 32].

Même si les autres conditions sont identiques, les exigences relatives au traitement des fondations des diverses zones du barrage seront différentes. Ainsi, sous le massif de recharge aval, tout dépôt gelé libre, même les argiles faibles, peu importe leur teneur en glace (enfouie ou non), peut être laissé sur place sans créer de danger pour les ouvrages. Néanmoins, si des sols de ce type existent sous le massif de recharge amont, il peut y avoir de forts tassements non uniformes pendant le dégel. C'est pourquoi le massif de recharge amont du barrage doit être conçu de manière à tolérer de grands tassements des fondations pendant le dégel, ainsi qu'une faible valeur de résistance au cisaillement des sols dégélés [27, 39].

Pendant la conception du barrage en matériaux meubles sur la rivière Irelyach, on a envisagé plusieurs solutions pour le traitement des fondations. Dans les zones de plaine inondable où les fondations du barrage devaient être construites, il y avait de dépôts de 6 m d'épaisseur constitués de loams silteuses et de boues à forte teneur en débris végétaux. La Solution I prévoyait l'excavation des dépôts jusqu'au substrat rocheux de roche semi-calcaire et de marne. Par contre, la Solution II prévoyait l'excavation de ces sédiments, mais seulement sous le massif de recharge amont du barrage, et leur maintien à l'état gelé sous le massif de recharge aval. Enfin, selon la Solution III, on devait laisser tous les dépôts en place dans les fondations.

On a effectué une analyse des travaux requis pour retirer ces matériaux des fondations du barrage et pour les remplacer par leur équivalent dans le corps du barrage. Selon cette analyse, la plus grande partie (les deux tiers) des travaux de remplissage envisagés par les deux premières solutions prévoyaient la substitution

loam and varved clays which has a layered structure was removed from the foundation. Sand drain piles were installed to improve the bearing capacity and consolidation conditions. There were serious difficulties in treating the foundation of the right bank dam because of the very soft consistency of the thawing saturated lacustrine-bog deposits. It was only after filling the bottom of the trench with gravel and pebbles and setting wood-metal rails for the excavators that the foundation treatment became possible.

Experience of dam building has shown that it is preferable to excavate soft soils during winter and spring. In summer, the productivity of excavation equipment significantly decreases because occasional slides may develop along the slopes and the growing seepage flow tends to liquefy everything making the excavation difficult [20, 23, 24].

The main factor that helps defining the arrangement for rock foundation treatment is the permeability in the rock massif during thawing. Thus, during the construction of Viluiskaya HPP I-II, the thawed dolerites in the dam foundation had a permeability coefficient smaller than 10 m/day, so giving the possibility to grout the rock during reservoir filling and thawing of the massif. If the permeability of the rock is higher and the head of water is large, then grouting becomes more difficult and it is necessary to do it before reservoir filling after a forced thawing of the foundation rock has been done. One of the more efficient method in this case is a warming of the frozen foundation by circulation of ground water with a temperature around 0.5°C. That type of grouting was achieved during the building of Kolymenskaya HPP [14, 32].

The requirements to treat the foundation for various zones of the dam are different, other conditions being equal. Thus underneath the downstream shell, any frozen loose deposits as far as weak clays with any ice content including buried ice can be left without presenting a structural danger. Nevertheless if such soils exist underneath the upstream shell, then during thawing large and non uniform settlements can develop. That is why the upstream shell of the dam must be designed to allow large settlements of the foundation during thawing as well as a low value of the shear strength for the thawed soils [27, 39].

During the design of the embankment dam on the Irelyach river, several alternatives of foundation treatment were considered. In the flood plain areas where the dam foundation was supposed to be built, there were alluvial deposits 6 m thick consisting of silty loams and muds with a large content of vegetation remnants. Alternative I included the excavation of the alluvial deposits down to semi-rock limestone and marl bedrock. According to Alternative II, these sediments were excavated only under the upstream shell of the dam and kept frozen underneath the downstream shell. Alternative III assumed all the alluvial deposits were left in the foundation and it was accepted.

An analysis of the work required to excavate the soils from the dam foundation and to place their equivalent in the dam body was made. According to that analysis, the main (2/3) part of the fill work in the first two alternatives is the substitution of one soil type for another. Since the excavated foundation soils are in a frozen state

d'un type de sol par un autre. Étant donné que les matériaux terreux excavés des fondations sont gelés et qu'il faudra congeler les matériaux de remplissage après leur mise en place, on a choisi la Solution III, qui consistait à laisser en place les matières alluviales riches en glace dans les fondations.

Afin d'améliorer la fiabilité de l'exploitation du système frigorifique prévu pour le noyau, on a construit le barrage avec un rideau d'étanchéité [5] s'enfonçant à travers les dépôts jusqu'au massif semi-rocheux, qui ne perdait pas sa capacité portante pendant le dégel. Par la suite, cette connexion du noyau du barrage avec ses fondations est devenue un cas type, qui a trouvé des applications dans plusieurs autres barrages en matériaux meubles gelés [32].

Pendant le traitement des fondations du barrage sur la rivière Oyuur-Yurege, on a enlevé la végétation et les dépôts, mais seulement sous le massif de recharge amont. On a creusé la tranchée de la clé du noyau à travers les dépôts, jusqu'à 0,5 m de profondeur dans la roche. Ce modèle prévoyait qu'on retirerait des fondations du massif de recharge amont 20 000 m³ de matériaux alluviaux constitués de loams et des blocs d'une teneur en glace de 40 %. Mais, étant donné qu'on prévoyait que ces matériaux allaient se tasser pendant le dégel et que tout tassement subséquent serait négligeable, on les a laissés en place dans les fondations du barrage.

Pendant la construction du barrage en matériaux meubles sur la rivière Sytycan (barrage de type gelé) et de celui de la rivière Novyi (barrage de type dégelé), on a d'abord laissé chauffer les fondations au soleil. Au printemps, on a retiré la couverture de tourbe et on a réchauffé les fondations pendant tout l'été. Cela a provoqué le dégel des inclusions de glace dans les sols gelés et le tassement des fondations avant le début de la construction du barrage en matériaux meubles. On a noté un tassement d'environ 3,4 m dans les fondations du barrage de la Novyi [5].

4.2. TENDANCES MODERNES POUR LE PASSAGE DE L'ÉCOULEMENT DÉTOURNÉ PENDANT LA CONSTRUCTION

Il y a deux méthodes principales pour le passage de l'écoulement d'un cours d'eau détourné pendant la construction : avec dérivation par des conduits appropriés, ou sans dérivation. C'est pourquoi ces travaux peuvent être effectués avec ou sans batardeau.

Le modèle avec dérivation du cours d'eau de son lit, qui est alors fermé par un batardeau, peut sembler le plus approprié ; toutefois, les conditions variables de l'écoulement, ainsi que les périodes prolongées d'étiage et de crues printanières à forts écoulements, diminuent considérablement l'efficacité de ce système parce que la dérivation nécessite la construction d'ouvrages temporaires très coûteux pour une courte période au printemps.

Pour les barrages de 100 à 120 m de hauteur, il faut construire des déversoirs multi-étages. Le nombre d'étages dépend de la hauteur du barrage, de la rapidité de la construction et de la charge de pression ultime sur les vannes du déversoir. L'expérience montre que la méthode la plus praticable consiste à creuser les déversoirs à des faibles niveaux et à les utiliser tant pour les opérations temporaires que permanentes.

and the fill has to be frozen subsequently, it was decided to choose Alternative III to leave the ice-rich alluvium in the foundation.

To provide a better reliability in the operation of the refrigerating system for the core, the dam was constructed with a cutoff [5] that went through the alluvial deposits and reached the semi-rock massif which does not lose its bearing capacity during thawing. Later this connection of the dam core with its foundation became a typical case and found application in several other frozen embankment dams [32].

During the treatment of the dam foundation on Oyuur-Yurege river, vegetation and alluvial deposits were excavated only under the upstream shell. The trench for the core key was excavated through the alluvial deposits and extended into rock for 0.5 m depth. The design provided for removal from the foundation of the upstream shell 20 000 m³ of alluvial materials consisting in loams and rubble with a 40% ice content. But since the settlement of those soils was supposed to happen during the thawing and that subsequent settlement would be negligible, they were left in the dam foundation.

During the construction of the embankment dams on Sytycan river (dam of frozen type) and Novyi stream (dam of thawed type), the foundation was previously heated with a sun radiation flow. In the spring, the moss-peat cover was taken off and during all the summer season, the foundation was warmed. As a result the ice-inclusions in the frozen soils were thawed and the foundation settlement occurred before the construction of the embankment dam began. The dam foundation on the Novyi stream had a settlement of about 3.4 m [5].

4.2. MODERN TRENDS IN PASSING THE DIVERSION FLOW DURING CONSTRUCTION

There are two main methods to take care of the diversion flow during construction: without diversion of the water from the riverbed and with its diversion through appropriate water conduits. That is why the work can be done with or without a cofferdam.

The scheme with diversion of the water outside the riverbed which is closed with a cofferdam could be regarded as the more suitable scheme. But the non-uniformity of the runoff, prolonged low water periods and spring floods with large flows do not allow the scheme to be very effective because diversion requires the construction of very expensive temporary structures for a short period during the spring.

For dams 100 - 120 m high, it is necessary to build multi-stage spillways. The number of steps depends upon the height of the dam, the rate of construction and the ultimate head on the spillway gates. The experience gives us evidence that the more rational method is to place the spillways at low levels and to use them both for temporary and permanent operations.

En hiver, les écoulements d'eau s'amenuisent, même ceux des grands cours d'eau. C'est pourquoi les travaux d'excavation et de construction des parties inférieures de l'ouvrage doivent être faits en hiver, avec des batardeaux protecteurs relativement petits. En même temps, les écoulements d'hiver normaux doivent passer par un lit rétréci ou par une dérivation à petite section transversale.

Il est préférable de faire passer la plus grande partie des crues du printemps et de l'été par le lit du cours d'eau, à travers l'ouvrage en construction ; par ailleurs, on peut prévoir la mise en place d'exutoires temporaires (comme des tunnels, des canaux et des canalisations de dérivation) à débit relativement faible. La construction de la CH de Viluiskaïa-1 a commencé par le creusement d'un canal dans le versant de la rive gauche de la vallée, afin de détourner la rivière pendant la construction. Avant l'achèvement du canal, l'écoulement du cours d'eau passait par son lit naturel, par la section ouverte de la digue de fermeture qui était construite simultanément à partir des deux rives de la rivière. Dès la fin des travaux d'excavation du canal, on a détourné l'écoulement vers ce dernier et on a effectué d'autres travaux pendant l'hiver, avec la protection du batardeau. Avant le remplissage du réservoir, on a fermé le canal avec des matériaux de remplissage pour permettre l'achèvement du noyau jusqu'à la culée de la rive gauche [4, 15].

Il faut donc que les ouvrages hydrauliques du Nord soient protégés par deux passages d'eau pendant la construction, l'un avec une petite section transversale pour le faible écoulement d'hiver, et l'autre pour les grandes eaux printanières. Mais, dans ce cas, l'inondation des diverses excavations est inévitable et il en résulte une interruption des travaux dans le lit du cours d'eau pendant l'été. Il faut poursuivre les travaux en hiver, malgré des conditions climatiques rigoureuses [5, 31, 35, 39].

Afin de réduire le coût des barrages en matériaux meubles et d'accélérer leur construction, il est recommandé de faire passer les eaux de crue du printemps et de l'été par-dessus le barrage en construction en mettant en place des dissipateurs d'énergie sur la face aval du barrage. C'est le modèle utilisé pour la construction des CH d'Ust-Khantayskaïa et de Kureiskaïa. Pendant la construction de la première, on a fait passer deux crues printanières par-dessus le barrage en construction, en laissant le niveau monter au-dessus de la crête. Pendant la construction du barrage gelé sur la rivière Sytycan, on a d'abord fermé la rivière avant le début des grands froids et ensuite, on a construit la partie du barrage dans le lit du cours d'eau jusqu'au niveau intermédiaire prévu de 15 m de hauteur, puis, on a installé le système frigorifique et gelé noyau. Au printemps de la deuxième année, la charge de pression de l'eau s'est élevée au-dessus du niveau intermédiaire et il a fallu laisser passer l'écoulement par-dessus la crête. Le printemps suivant, la crue a dépassé deux fois le niveau nominal d'inondation et les eaux sont passées par-dessus le barrage. C'était la première fois, au cours de la construction d'un barrage du Nord, qu'on utilisait avec succès la technique du déversement du trop-plein par-dessus un barrage non terminé pendant deux années consécutives, avec une charge de pression d'environ 10 m. La vitesse maximale de l'eau par-dessus le noyau ne dépassait pas 0,8 m/s. Par la suite, la partie dégelée du noyau a été recongelée. La protection en enrochement à l'intérieur du passage d'eau avait été détruite en partie.

Au cours de la quatrième année des travaux de construction, la crue printanière est passée par le déversoir permanent, alors que le barrage gelé atteignait son niveau nominal.

In winter, the discharge of water becomes small even for large rivers: that is why excavation and construction of the lower parts of the structure shall be made in winter using rather small protection cofferdams. At the same time, the normal winter discharge shall be passed through a constricted riverbed or through a bypass with a small cross section.

It is advisable to pass the main part of the spring and summer floods using the riverbed and through the structure under construction while temporary water outlets (such as diversion tunnels, channels, pipes) can be designed with a relatively small passing capacity. The construction of Viluiskaya HPP-1 started with digging a channel in the left bank slope of the valley to divert the river during construction. Before the artificial channel was ready, the river flow was passed through its natural channel using the open portion of the closure dyke that was constructed simultaneously from both banks of the river. As soon as the excavation of the channel was finished, the river flow was diverted to it and other works were carried out under the protection of the cofferdam during the winter. Prior to reservoir filling, the channel was closed off with a fill to allow the core to be completed to the left bank abutment [4, 15].

Consequently it is required that the northern hydraulic structures be protected with two water passages during construction ; one with a small cross section to pass the low winter flow and another to pass the spring flow. But in this case, the flooding of the various excavations is inevitable and as a result there is an interruption of work in the riverbed during the summer season and work must be continued in winter despite severe climatic conditions [5, 31, 35, 39].

To reduce the cost of embankment dams and accelerate their construction, it is recommended to pass the spring summer flood over unfinished dams by constructing energy dissipators on the dam downstream face. That scheme was used during the construction of Ust-Khantayskaya HPP and Kureiskaya HPP. When the Ust-Khantayskaya HPP was under construction, two spring flood flows were passed over the unfinished dam by overflowing the crest. During the construction of the frozen dam on the Sytycan river, the river was first closed before the severe frosts began and the part of the dam in the riverbed was built up to the designed middle level of 15 m in height, the refrigerating system was installed and the core was frozen. In the spring of the second year, the water head raised above the middle level mark and the flow had to be discharged over the crest. The next spring, the flood flow exceeded twice the design flood and it was also discharged over the dam. It was the first time in the dam construction practice in the North that a non finished dam was successfully operated as an overflow spillway during two successive years with a head of about 10 m. The maximum velocity of water over the core did not exceed 0.8 m/s. Afterwards, the thawed part of the core was frozen again. Part of the stone protection inside the water passage was destroyed.

The spring flood of the fourth construction year was passed through the permanent spillway channel while the frozen dam had reached the design level.

La construction de la CH de Kureiskaia, dont tous les passages d'eau et les installations de production d'énergie sont situés sur la rive droite, a connu encore plus de succès (Fig. 12). Le tunnel de dérivation a été conçu pour le passage des seuls écoulements d'automne et d'hiver. La crue printanière, qui est passée d'abord par-dessus le barrage en construction, a emprunté par la suite le déversoir inachevé [15, 24, 25, 31, 35].

4.3. ÉCOULEMENT DES GLACES PAR DES OUVRAGES TEMPORAIRES ET PERMANENTS

On peut rencontrer des conditions difficiles s'il faut faire passer la glace flottante du printemps par les ouvrages. Sur les cours d'eau s'écoulant du sud vers le nord, la glace conserve une grande résistance (de 80 à 100 % de sa résistance maximale d'hiver) au moment de la débâcle. Des intumescences de crue précèdent habituellement les vagues de réchauffement qui causent la formation d'embâcles dans les méandres ou dans tout ouvrage construit dans le lit du cours d'eau. Une hausse considérable du niveau d'eau accompagne ces embâcles, puis des ondes de débâcle causent de fortes inondations dans les secteurs en aval. Les masses de glaces flottantes peuvent causer d'importants dommages aux ouvrages hydrauliques temporaires et permanents.

Les petits cours d'eau et les parties peu profondes des fleuves et rivières gèlent souvent jusqu'au fond, de sorte que les inondations passent parfois par-dessus ce bouchon de glace.

Au cours de la première étape de la construction de barrages en matériaux meubles, la glace passait habituellement par-dessus des batardeaux peu élevés partiellement érodés. Au cours des étapes subséquentes, elle passait par des sections rétrécies du lit du cours d'eau, ainsi que par des ouvrages temporaires de dérivation comme des tranchées, des canalisations et des tunnels. L'expérience a montré que la largeur du lit peut être réduite à environ 60 % de sa valeur normale. Pour que la glace passe bien à travers ces sections rétrécies, il faut procéder à une élimination préliminaire de la glace dans les parties étroites et en aval du cours d'eau afin de retarder la débâcle du couvert de glace en amont, construire des murs de dérivation résistants dans les batardeaux longitudinaux et créer des points de broyage de glace juste avant la partie étroite ou le goulet d'étranglement emprunté par les crues.

La meilleure façon de changer les caractéristiques de la glace pendant la construction d'un barrage en matériaux meubles consiste à réguler l'inondation de manière à retarder le processus d'entraînement des glaces flottantes qui s'accumulent dans la section amont. À cette fin, il faut créer une élévation du niveau d'eau en amont, accompagnée d'une rupture du couvert de glace à partir des rives. On facilite ainsi la dégradation du couvert de glace par des processus naturels comme le rayonnement solaire, la pression des vents et les précipitations atmosphériques. Il y a aussi des méthodes artificielles qui permettent de réduire la résistance de la glace, par exemple en la recouvrant de matières à capacité d'absorption thermique supérieure à celle de la glace, comme du sable, des cendres, des scories et de la poussière de charbon, ou à l'aide de traitements chimiques faisant appel à divers sels ou leurs solutions. On peut également briser la glace mécaniquement avec des explosifs.

Toutes ces procédures doivent prendre en compte les principes de la sécurité environnementale [5, 26, 39].

The Kureiskaya HPP project was more successful with all water passages and power installation located on the right bank of the river (Fig. 12). The diversion tunnel had been designed for passing only the autumn and winter flows while the spring flood was passed first over the unfinished dam and then through the unfinished spillway [15, 24, 25, 31, 35].

4.3. ICE DISCHARGE THROUGH TEMPORARY AND PERMANENT STRUCTURES

Difficult conditions may arise when it is necessary to pass the spring floating ice through the structures. On rivers flowing from south to north, the ice retains a high strength (it is equal to 80 - 100% of the winter maximum strength) by the time of ice breaking. Flood waves usually precede warming waves causing jams in meanders or in any artificial construction of the riverbed. A considerable rising of the water level accompanies these jams and jam breaking waves cause intensive flooding of the downstream areas. Floating ice masses can cause important damages to temporary and permanent hydraulic structures.

Small streams and shallow parts of rivers often freeze to the bottom so that floods are sometimes discharged over the ice cover plug.

During the first stage of construction of embankment dams ice is usually passed over partly scoured low cofferdams. During subsequent stages, ice is passed through narrowed riverbed sections and along temporary bypass structures: excavated trenches, channels pipes and tunnels. The experience has shown that the river channel can be narrowed down to about 60% of its natural width. For a successful passing of the ice through narrowed sections, it is required to make a preliminary ice removal from the narrow parts of the river and the downstream portion to delay artificially the breaking of the ice cover upstream, to construct resistant training walls in the longitudinal cofferdams and providing ice crushing points in that particular section where the stream enters in the narrow part or the bottle neck.

The main way to change the ice characteristics during the construction of embankment dams is to provide a regulation of the flood to delay the ice floating process in the upstream section. For this purpose, it is necessary to provide a rising of the water level in the upstream together with a tearing of the ice cover from the banks. The degradation of the ice cover in this case becomes easier because of natural causes like solar radiation, wind loads and atmospheric precipitations. There are also some artificial method available to reduce that ice strength like covering it with a material that has a heat absorption higher then ice such as sand, ash, slag and coal dust or using a chemical treatment with different salts and their solutions. The ice can also be broken down mechanically with explosives.

All these procedures shall take into account the environmental safety [5, 26, 39].

5. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION

Pour tous les sites des projets hydrauliques dans la zone cryolithitique, il faut des travaux d'excavation de mort-terrain et de roc beaucoup plus importants que pour les barrages du Sud, parce qu'il faut utiliser un maximum de matériaux terreux locaux afin de réduire autant que possible le volume des matériaux importés de régions éloignées.

L'expérience montre que les difficultés techniques importantes sont relativement rares, ce qui permet de poursuivre les travaux pendant toute l'année avec la même machinerie.

Pendant la construction de la CH de Kolymaskaïa, on a étudié en détail les caractéristiques des travaux de construction des ouvrages dans des conditions de pergélisol [15, 25].

5.1. EXIGENCES RELATIVES À L'ANGLE DES PENTES ET AUX DIMENSIONS DES BERMES

Habituellement, pendant la conception, on tient compte des facteurs naturels suivants pour déterminer l'angle des pentes : l'activité sismique de la région et la structure géologique du site de l'excavation, la préservation et la fracturation de la roche, les caractéristiques tectoniques et les autres types de faiblesses de la roche, la direction dominante des joints et l'orientation des plans des pentes artificielles, les caractéristiques hydrogéologiques du site, et enfin, la diminution de la charge des pentes avec l'apparition de fissures parallèles à la pente de l'excavation.

La prise en compte de tous ces facteurs est assez difficile, même dans les sites sans pergélisol. Il va sans dire qu'elle est plus difficile dans les zones de pergélisol parce que, pendant la formation de ce dernier dans le massif rocheux, les conditions des diverses parties sont inégales, ce qui fait que les caractéristiques et l'intensité des fissures exogènes sont différentes, tout comme leur saturation avant le gel et la dynamique du processus de gel. Ainsi, les zones formées dans un massif de roche gelée ont des caractéristiques différentes de teneur en glace, de saturation en glace et de soulèvement dû au gel. Pendant la construction et l'exploitation d'ouvrages hydrauliques, beaucoup de facteurs comme les conditions de gel et les températures, la composition et la structure de la roche et, par conséquent, ses propriétés, subissent des changements substantiels [12, 16, 19].

On doit aussi tenir compte des facteurs supplémentaires suivants au cours de la détermination des pentes qui doivent être pratiquées dans la roche gelée :

- une plus grande profondeur de la zone d'altération de la roche que dans des conditions normales ;
- l'effet de cimentation de la glace et des matériaux de remplissage gelés dans les fissures diminue en été à cause du percolation et du dégel pendant les travaux d'excavation ;

5. SPECIFIC FEATURES OF CONSTRUCTION WORKS

All the sites of hydraulic projects in the cryolithozone have considerably larger volumes of earth and rock excavation than those in the South because of the need for maximum use of local soil construction materials reducing as much as possible the volume of materials delivered from elsewhere.

Experience shows that relevant technical difficulties are relatively small and allows to work the year around with the same machinery.

In the conditions of permafrost, the construction of works presents specific features that have been well observed during the construction of Kolymskaya HPP [15, 25].

5.1. REQUIREMENTS TO THE SLOPE ANGLE AND THE BERM DIMENSIONS

Conventionally the following natural factors are taken into account in slope angle design: the seismic activity of the region and the geological structure of the site where the excavation is located ; the rock preservation, the rock fracturing, the characteristics of tectonic and other kinds of rock weaknesses, the dominant direction of joints and the orientation of the designed slope planes, the hydrogeological characteristics of the site ; the decrease of slopes loading with fissures appearing parallel to the excavation slope.

To take into account all these factors is sufficiently difficult even where there is no permafrost. It becomes more difficult in permafrost zones because, during the permafrost formation in the rock massif, conditions are unequal on various parts and so exogenetic cracks differ in their characteristics and intensity as well as their saturation before freezing and the dynamics of the freezing process. As a result, zones formed in a frozen rock massif have a different ice content, ice saturation and frost heaving. During the construction and exploitation of hydraulic structures, many factors such as freezing conditions, temperatures of the rock, its composition, structure and consequently its properties change substantially [12, 16, 19].

The following additional factors should also be considered when designing the slopes for excavations in frozen rock:

- a larger depth of rock weathering than under normal conditions ;
- the fact that the cementing influence of ice and frozen fillings in the fissures decreases in summer because they thaw during excavation and under the influence of seepage ;

- les déversements abrupts et soudains de matériaux dans les pentes creusées, qui surviennent pendant la période de dégel de la saison chaude, causent souvent des affaissements dans celles-ci ;
- il faut évaluer la stabilité des pentes dans des conditions de gel et de dégel et dans les conditions des matériaux dégélés, et il faut choisir les angles des pentes en fonction des conditions prévues pour les divers types de roche.

Pour ces raisons, les pentes pratiquées dans les sols gelés doivent être moins abruptes.

Après le creusement d'une partie de l'excavation requise pour un déversoir permanent à la CH de Kolymskaïa et l'observation de ses effets sur les divers processus actifs dans les pentes excavées du déversoir temporaire et de la prise d'eau temporaire, on a décidé d'augmenter la pente gauche du déversoir à une valeur de 1 : 1. De plus, les bermes d'un massif gelé doivent être de deux à trois fois plus larges que celles d'un massif dégélé.

5.2. TRAVAUX DE DYNAMITAGE

L'expérience a montré que le facteur déterminant de l'efficacité des explosions est la cimentation par la glace ou par les matières de remplissage gelées des joints, qui renforcent la solidité de la roche. Parce que la résistance que doit surmonter le dynamitage est supérieure de 10 % à celle de la roche dégélée, il faut diminuer de la même valeur l'espacement entre les trous forés. À cause de la plus grande quantité d'explosifs nécessaire et du volume de roche à briser, le coût des explosifs augmente de 20 % [15].

Il faut noter que le dynamitage contrôlé n'a pas réussi à protéger les pentes des affaissements. C'est ce qu'on a observé pendant la construction de la CH de Kolymskaïa, parce qu'on n'a pas réussi à assurer la stabilité à long terme de la pente. Après une ou deux saisons, la surface nivelée a commencé à se détacher le long des plans des joints naturels, principalement pour les raisons suivantes :

- pendant l'été et l'automne, il y a eu un dégel intense du massif de granite (jusqu'à une profondeur de 9 m) ; ensuite, l'absorption des eaux de surface a contribué à augmenter la profondeur du dégel et à réduire la résistance de la roche ;
- pendant l'hiver, il y a eu une forte altération par le gel; on a noté de 50 à 70 cycles de gel-dégel à la surface de la roche ;
- la présence de joints favorisant l'altération, disposés en parallèle ou formant un angle aigu par rapport à la surface de la pente, a contribué à perturber les lignes de contour prévues.

L'action combinée de tous ces facteurs a causé le bris de la roche non pas le long de la ligne des trous forés, mais à travers le profil du joint plus près de la surface de la pente.

Il y a d'autres facteurs non moins significatifs : un gel de la masse rocheuse en hiver qui la transforme en monolithe, spécialement si les joints contiennent une

- the abrupt and sudden unloading in the excavated slopes during thawing of the warm season often brings slope failures ;
- the necessity to evaluate the stability of the slopes in frozen, thawing and thawed conditions and to design the slope angles in accordance with predicted rock conditions.

Due to the above reasons the excavations in the frozen grounds must have less steeper slopes.

When a part of the excavation for the permanent spillway of Kolymkaya HPP had been opened and that there were results of observation about the various processes developing in the bare slopes of the temporary spillway and temporary intake structures, it was decided to increase the left slope of the spillway to a value of 1:1. The berms in a frozen massif shall be made 2-3 times wider than in a thawed massif.

5.2. BLASTING WORKS

Experience has shown that the decisive factor on the efficiency of the explosion effect is the cementation by ice or frozen filler of the joints which gives the rock additional solidity. The resistance that must be overcome by blasting is more than the resistance in thawed rock by 10 %, so the space between the boreholes shall be reduced by 10%. The quantity of explosives and the volume of broken rock give a 20% increase in the cost of explosives [15].

In particular, the controlled blasting fails to protect slopes from failure. During the construction of Kolymkaya HPP, controlled blasting has failed to provide long-term slope integrity. After one or two seasons, the smoothed surface began stripping along the planes of natural joints for the following basic reasons:

- during the summer-autumn season, intense thawing of the granite massif (up to 9 m depth) occurred ; absorption of surface waters contributed to increase the depth of thawing and to reduce the strength of the rock ;
- during the winter season, there was an intense frost weathering and the annual amount of freezing-thawing cycles on the rock surface was 50 - 70 ;
- the unfavourable occurrence of steep joints, arranged in parallel or making an acute angle to the slope surface, contributed to disturbance of the design contours.

The combined action of all the above factors lead to a breakage of the rock not along the line of the boreholes but through the joint pattern closer to the slope surface.

Not less significant factors are: a freezing of the rock mass in winter turning it into a monolith especially if the joints contain a great amount of fines ; the necessity

grande quantité de particules fines ; la nécessité de relâcher la roche avant l'excavation, surtout s'il y a eu de longues interruptions des travaux ou si l'assèchement ou le drainage sont insuffisants.

On note des problèmes de sécurité s'il est nécessaire de creuser en profondeur dans un massif rocheux facilement altéré, parce qu'il faut assurer la sécurité des travaux. Ces problèmes sont dus au fait que les cas d'instabilité soudaine deviennent plus difficiles à prévoir à cause des particularités climatiques propres à cette région, où l'amplitude annuelle des variations de température est d'environ 95°C, et à cause des fluctuations de température quotidiennes pendant une longue période au printemps et à l'automne. Il en résulte donc une altération cryogénique plus intensive dans les pentes ouvertes des excavations.

Les travaux d'excavation dans les sols sont plus difficiles aux basses températures parce que le sol devient plus rigide pendant le gel, ce qui nécessite des travaux supplémentaires d'ameublissement, sauf dans le cas des sols gelés de particules libres et des sols non cohésifs à faible teneur en eau. Néanmoins, on fait souvent les travaux d'excavations dans les sols en hiver à cause de la difficulté d'assécher les sols à grains grossiers qui forment habituellement des dépôts et qui sont caractérisés par une perméabilité élevée ou par une sursaturation en eau dans le cas des sols silteux et argileux, sur lesquels il faut mettre en place une chaussée de billots, ou dont les fondations doivent être renforcées par des matériaux à grains grossiers pour améliorer les conditions des opérations de camionnage. De plus, en été, le sol est très humide et la productivité des tombereaux diminue à cause de la boue qui s'échappe des bennes pendant le transport et qui adhère aux parois.

5.3. MISE EN PLACE DES MATÉRIAUX TERREUX

On peut mettre en place et compacter les matériaux dans les coudes et dans les zones de transition et de filtration pendant toute l'année. Néanmoins, en hiver, ces opérations sont un peu ralenties parce qu'il faut enlever la neige de la surface de la couche terminée avant d'étendre la prochaine.

La partie étanche des barrages en matériaux meubles est soit étendue et compactée à sec couche par couche sèche, soit formée par voie humide, par déversement dans des bassins d'eau où le sol se compacte sous son propre poids. Cette dernière méthode donne de meilleurs résultats avec les sols contenant des particules de différentes tailles, pouvant atteindre 100 mm, par exemple de la moraine. Évidemment, en hiver, les méthodes ci-dessus sont moins pratiques à cause du gel rapide des sols. Pour obtenir les propriétés du sol souhaitées, il faut souvent appliquer des technologies spéciales [2, 7, 14, 15, 39].

Pour construire la partie étanche des barrages de type dégelé en hiver, il faut satisfaire à deux exigences de base :

1. il faut que le sol atteigne sa masse volumique nominale avant qu'il ne gèle ;
2. il faut obtenir un contact durable entre les couches.

Pour satisfaire à la première exigence, il faut maintenir le sol à une température suffisamment élevée pour prévenir le gel dans la carrière, pendant le transport et pendant la mise en place.

to loosen the rock again before excavation if there are long term work interruptions or insufficient dewatering or drainage.

Safety problems arise if it is necessary to make deep excavations in an easily weathered rock massif because safety of the works must be provided. The problem of a sudden instability becomes more difficult to predict due to specific climatic peculiarities of the region where the annual amplitude of temperature variation is about 95°C and the daily temperature fluctuations last for a long time in the spring and the autumn. As a result, the cryogenic weathering becomes more intensive in the open slopes of the excavations.

To excavate in soils is more difficult in cold weather because the soil becomes more rigid during freezing which requires additional loosening, except for loose-frozen and non-cohesive soils with a small water content. Nevertheless, excavations in soils are often made in winter due to difficulties to provide dewatering of coarse-grained soils usually incorporated in alluvial deposits and characterised by a high permeability or to an oversaturation of the silty and clayey soils where an arrangement of log pavement or filling the foundation with coarse-grained material are required to improve truck operations. Also in summer the soils are very wet and the productivity of the dumpers decreases because the liquified soils leak out of the trucks during transportation and stick to the walls of the dumper.

5.3. PLACEMENT OF GROUND MATERIALS

The placement of the materials in the shoulders, transition and filters zone can be carried out with compaction during the whole year. Nevertheless in winter, the operation is somewhat delayed because of the necessity to take off the snow from the surface of the finished layer before laying the next one.

The watertight portion of the embankment dams is either spreaded and compacted in the dry layer by layer or dump into water pools where the soil self-compacts by its own weight. The last method gives best results with soils containing particles with different sizes up to 100 mm, for instance moraine. Obviously in winter, it is less efficient to use the above mentioned methods due to the quick freezing of the soils. To get the desired soil properties, it is often required to apply special technological methods [2, 7, 14, 15, 39].

To build the watertight portion of dams of the thawed type during winter two basic requirements shall be satisfied:

1. the designed density of the soil shall be achieved before it freezes ;
2. a reliable contact between the layers must be obtained.

The first requirement is satisfied by keeping the temperature of the soil in the quarry, during transportation and placement high enough to prevent the soil from freezing.

La tâche la plus difficile est d'assurer un contact durable entre les couches. En hiver, sans mesures spéciales, la surface de la couche gèle pendant les opérations de cylindrage. Si on poursuit celles-ci après le gel, la surface commence à se fracturer, et des fissures verticales apparaissent sur la surface (2 cm de largeur et 10 cm de profondeur).

Sur certains sites de construction (CH de Viluiskaïa et de Kolymaskaïa), pour prévenir la formation de fissures, on étend une solution concentrée de NaCl ou de CaCl₂ sur la surface de la couche en place. Ainsi, la température de gel de la surface est abaissée et on empêche ainsi la formation de fissures pendant le cylindrage.

Le deuxième épandage est effectué pendant l'étape préparatoire, avant la mise en place de la prochaine couche, afin de plastifier la surface et de prévenir le gel de la zone sous celle-ci [5, 15].

Pendant la construction du barrage de la CH de Viluiskaïa, on appliquait de 2 à 4 litres de solution saline par mètre carré de surface à chaque épandage, ce qui assurait la durabilité des contacts entre les diverses couches. On a aussi appliqué cette procédure lorsque la teneur en eau des matériaux d'emprunt n'était pas optimale.

Pendant la construction du barrage de la CH d'Ust-Khantaiskaïa, la teneur en eau du matériau d'emprunt dépassait la teneur en eau optimale d'environ 3 à 8 %, et les conditions climatiques ne permettaient pas de la réduire ; on a donc modifié la procédure. Pendant la mise en place, on n'a pu obtenir la masse volumique nominale, mais on a observé strictement les conditions d'imperméabilité, afin d'empêcher la formation de fissures. La masse volumique nominale a été atteinte après quelques années d'exploitation, à cause des tassements [24].

La méthode de la salinisation s'est avérée utile en toute saison pour la construction des zones étanches de grands barrages dans les régions les plus froides du pays.

The most difficult task is to provide a reliable contact between the layers. In winter without special measures, the surface of the layer freezes during the rolling. If the rolling is continued after freezing, then fracturing of the surface begins with the appearance of vertical cracks on the surface (2 cm wide and 10 cm deep).

On some construction sites (Viluiskaya, Kolymkaya HPP) to prevent the creation of cracks, a concentrated solution of NaCl or CaCl₂ was spread over the surface of the placed layer. This way, the freezing temperature of the surface is lowered and it prevent the formation of cracks during the rolling.

The second spread is made when preparing to place the next layer to plasticize the surface and prevent the freezing of the lower zone of the layer being placed [5, 15].

During the construction of Viluiskaya HPP dam, the amount of solution varied from 2 to 4 liter per square meter of the surface for each spreading and that amount ensured a reliable quality of contacts between the separate layers. This procedure was also applied when the water content of the borrow material differed from the optimum.

During the construction of Ust-Khantaiskaya HPP dam, the water content of the borrow material exceeded the optimum water content by about 3 - 8% and the climatic conditions did not allow to decrease it. So that procedure was modified. During placement, the designed density could not be achieved but impermeability conditions were strictly observed and the formation of cracks was not allowed. The designed density was obtained in the first years of operation because of settlements [24].

That salinization method proved useful the year around to built watertight zones of large dams in the coldest regions of the country.

6. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE L'EXPLOITATION, DE LA RÉPARATION ET DE LA RESTAURATION DES BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES

Les sols gelés de façon permanente dans des conditions naturelles sont caractérisés par une résistance élevée, une faible déformabilité et une faible perméabilité. Habituellement, ces propriétés se dégradent notablement en raison directe avec l'augmentation de la température.

La construction, et notamment l'exploitation des barrages, entraînent des changements de régime thermique dans la masse du sol, par rapport aux conditions antérieures. La principale source de chaleur est l'eau stockée dans le réservoir. Cette masse d'eau contribue à dégeler les fondations, le corps des barrages et les rebords du réservoir, ainsi que le lit et les rivages des cours d'eau de la partie de la vallée en aval du barrage.

La transition du sol de l'état gelé à l'état dégelé peut provoquer une déformation du même type que celles dues à la construction d'un barrage à l'extérieur de la zone de pergélisol. Le processus de dégel progresse assez rapidement et de façon irrégulière, ce qui provoque l'apparition de déformations tout aussi irrégulières qu'inattendues. Par exemple, des voies de percolation intensive et rapide peuvent apparaître dans les zones de talik et transporter des matériaux, avec des effets négatifs en conséquence.

La percolation est l'une des causes les plus courantes des cas de dommages et de rupture observés dans les barrages des zones cryolitiques. Les autres causes sont le tassement dû au dégel (23 %), la formation de fissures dans le corps du barrage (15 %) et la perte de stabilité de diverses parties du barrage (7 %).

On présente ci-dessous des exemples typiques d'apparition de déformations dans divers types de barrages pendant l'exploitation, ainsi que les principes de base des travaux de réparation et de restauration.

6.1. BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES DE TYPE GELÉ

6.1.1. Barrage de la centrale thermoélectrique d'Anadir

Le barrage de la CT d'Anadyrskaja a été construit sur la rivière Kazachka dans des conditions géologiques et climatiques très complexes sur le plan technologique. Ses fondations reposent sur des sols argileux riches en glace (teneur volumétrique en glace de 20 à 80 %), surtout de type silteux, avec des lentilles et des intercouches de gravier et de sable entourant des masses de glace polygonale veinée reposant sur des loams et des argiles marines pauvres en glace pratiquement imperméables (Fig. 13). Il y a aussi des intercouches et des lentilles de glace enfouies dans les

6. SPECIFIC FEATURES OF OPERATION, REPAIR AND REHABILITATION OF EMBANKMENT DAMS

Permanently frozen soils in natural conditions are characterized by a high strength and low deformability and permeability. Usually, these properties are significantly degenerated as the temperature rises.

Construction and especially operation of dams lead to changes in the previous thermal regime of the ground massive. The main source of heat is water stored in the reservoir. The foundation, dam body and reservoir banks, as well as the near river bed and banks of the valley downstream of the dam are thawed under the influence of water.

The transition of soil from the frozen to the thawed state can initiate a deformation of the same type as in a dam constructed outside the permafrost zone. The process of thawing develops rather fast and irregularly, therefore deformation appears unexpectedly and irregular as well. For example, intensive high rate seepage paths can appear in talik zones leading to a transport of materials with its corresponding negative effects.

Seepage is one of the most typical reasons for damage and failure of dams in cryolitic zones. Other reasons are settlement due to thawing (23%), crack formation in the dam body (15%) and a loss of stability of various parts of the dam (7%).

Typical examples of deformation development in various types of dams during operation and principles sustaining repair work and rehabilitation are given below.

6.1. EMBANKMENT DAMS OF THE FROZEN TYPE

6.1.1. Dam of Anadir thermoelectric power plant

The dam of Anadyrskaya TPP was built on Kazachka River in very complicated engineering geological and climatic conditions. Its foundation rests on ice-rich (volumetric ice content 20-80%) mainly silty clayey soils with lenses and interbeds of gravel and sand enclosing polygonal-veined ice underlaid by practically impervious ice poor marine loams and clays (Fig. 13). There are also interbeds and lenses of buried ice in the bank abutments. When the foundation soils thaw, they take a liquid consistency and the foundation loses its bearing

culées de la rive. Lorsque les matériaux terreux des fondations fondaient, ils prenaient une consistance liquide et les fondations perdaient leur capacité portante. Le coefficient de dégel passait de 0,15 à 0,50. La valeur moyenne prévue du tassement dû au dégel était comprise entre 2,5 et 3,0 m, et le tassement supplémentaire des fondations sous la charge du barrage à l'intérieur de la zone de talik pouvait atteindre 1,0 m.

Une zone fermée de talik de 3 à 4 m d'épaisseur et de 10 à 12 m de largeur était située sous le lit du cours d'eau. Dans des conditions naturelles, les sédiments alluviaux sur place étaient caractérisés par une certaine salinité (pouvant atteindre 1,4 %).

On a construit un barrage en matériaux meubles de type dégelé en 1964. Ce type de barrage et les caractéristiques des matériaux terreux des fondations exigent des travaux considérables pour le traitement des fondations. Afin de compenser le tassement non uniforme pendant le dégel de la couche supérieure des fondations saturées de glace, on a suggéré la mise en place d'un massif amont aplati (rapport 1 V : 2,5 H) avec une tranchée de pied creusée jusqu'à 6 m, où se trouvaient la plupart des matériaux terreux glacés. La tolérance pour le tassement des fondations des massifs de recharge amont et aval était de 1 m en moyenne. On a porté la largeur du barrage jusqu'à 8 m pendant la construction.

On a construit le barrage pendant la saison chaude. Au début, la couverture végétale a été enlevée par des buteurs et, pour construire le barrage, on a empilé par couches des matériaux terreux dégelés; chaque couche était nivelée par les buteurs et tassée par des compacteurs sur pneus. On a constaté qu'il était impossible d'assécher la rivière et de construire le barrage en une seule saison et pour cette raison, on a décidé de construire le barrage par remblayage hydraulique longitudinal.

On a construit la partie centrale du barrage avec du sable fin et de la loam sableuse, et les massifs de recharge, avec du sable graveleux et des blocs. La jonction du barrage avec les loams denses des fondations et les culées des vallées devait être faite avec une clé de loam, mais, pendant le creusement de la tranchée parafouille, on a noté un dégel et un fluage du sol, et la tranchée s'est remplie d'eau; pour cette raison, on a décidé de remplir la tranchée parafouille de matériaux terreux à grains fins par remblayage hydraulique [5].

Pendant le remplissage du réservoir, la couche de sol dégelé s'est agrandie et, à l'automne de 1968, elle mesurait 30 m de largeur par 6 m d'épaisseur. La température du talik était comprise entre 2 et 8°C.

On a construit le déversoir sur la rive droite, dans la culée du barrage. C'était un déversoir en bois sur pieux, creusé jusqu'à 5 m. Il y avait des diaphragmes en bois sous les parties amont et intermédiaire de la goulotte, placés dans des tranchées de 3 m de profondeur. Au cours de l'automne de 1965, le déversoir a été détruit par une inondation, mais on l'a restauré au printemps de 1966. On a pu exploiter le barrage avec une marge de sécurité suffisante, malgré une certaine déformation.

Il y avait de la percolation dans les fondations du barrage, dans la partie du lit où étaient situés les restes de matériaux de talik. La percolation a diminué d'octobre à décembre, puis, elle est restée constante jusqu'en juin. On a découvert une percolation saisonnière dans la partie supérieure du barrage, dans une section de 30

capacity. The thawing coefficient changes from 0.15 to 0.50. The average value of settlement due to thawing was predicted to be 2.5-3.0 m. Additional settlement of the foundation under the loading of the dam within the talik zone could reach 1.0 m.

A closed talik 3-4 m thick and 10-12 m wide was located under the riverbed. In natural conditions, alluvial sediments in-situ were characterized by a certain salinity (to 1.4%).

An embankment dam of the thawed type was constructed in 1964. The dam type and the characteristics of the foundations soils required considerable work for the foundation treatment. In order to compensate the nonuniform settlement during thawing of the ice-saturated upper layer of the foundation, a flat upstream slope (1 V:2.5 H) was suggested with a toe-trench deepened to 6 m where most icy soils were located. The reserve for foundation settlement of the upstream and downstream shells was 1 m on the average. The width of the dam was enlarged to 8 m during construction.

The dam construction was carried out during the warm season. In the beginning, the vegetation was removed by bulldozers and thawed soils were placed on the dam by layers, each layer being leveled with bulldozers and compacted with pneumatic rollers. It turned out to be impossible to dewater the river and to build the dam in one season, so it was decided to built the dam by a longitudinal hydraulic filling.

The central part of the dam was constructed from fine sand and sandy loam, and the shoulders were constructed from gravelly sand and stones. The junction of the dam with the dense loams of the foundation and the valley abutments was supposed to be made with a loam key. But during excavation of the cutoff trench, there was thawing and creeping of the soil and the trench was filled with water; consequently it was decided to fill the key trench with fine grained soils by hydraulic filling [5].

During the reservoir filling, the thawed soil zone expanded and by the fall of 1968 its dimensions had reached 30 m in width and 6 m in thickness. The temperature of the talik was between 2° and 8°C.

The spillway was built on the right bank in the dam abutment. It was a wooden spillway on piles deepened for 5 m. There were wooden diaphragms under the upstream and middle parts of the chute, which were placed into 3 m deep trenches. In the autumn of 1965, the spillway was destroyed by the flood and was rehabilitated by the spring of 1966. The dam has operated with sufficient safety in spite of some deformation.

There was seepage in the foundation of the dam in the riverbed part where there were remnants of talik materials. The seepage decreased from October to December and then remained constant till June. Seasonal seepage was discovered in the upper part of the dam in a section 30-40 m wide above the riverbed. The seepage

à 40 m de largeur au-dessus du lit. La percolation s'est arrêtée quand le sol a gelé. Après quatre années d'exploitation, l'examen du barrage a mis en évidence un grand nombre de fissures, pouvant atteindre 50 m de longueur et 3 cm de largeur, à cause d'un processus thermokarstique [5, 18] dans la crête et le long des rebords des faces amont et aval. Étant donné qu'on croyait que le volume du réservoir existant pouvait être insuffisant pour satisfaire aux besoins en énergie de la région, on a entrepris la construction d'un nouveau barrage qui incorporait l'ancien.

Pour ce nouveau barrage, on a choisi le type gelé, à cause des conditions climatiques, géocryologiques et techniques de la région. Le premier modèle proposé était un barrage classique, avec un noyau et une tranchée parafouille remplie de matériaux loameux.

Le modèle final, modifié après des recherches et des études expérimentales, prévoyait la construction d'un barrage homogène avec des blocailles, des galets et un bouclier de glace [18, 19]. Ce bouclier, qui passe à travers le corps du barrage et les sols riches en glace (perméables après le dégel) des fondations, s'enfonce de 1 à 2 m dans le loam du pergélisol. (Fig. 13b). On a étendu les matériaux sur des fondations naturelles recouvertes de tourbe. On n'a enlevé qu'une épaisseur de 0,5 m de celle-ci, dans la partie centrale des fondations.

Les matériaux étaient placés à l'état sec dans les massifs de recharge amont et aval du barrage; dans la partie centrale, ils étaient placés dans des bassins remplis d'eau. On a installé le bouclier de glace dans le corps et les fondations du barrage à l'aide d'appareils frigorifiques vapeur-liquide fonctionnant de façon saisonnière, utilisés pour la première fois pour des travaux hydrauliques dans ce pays.

Les colonnes réfrigérantes étaient situées sur les culées droite et gauche du barrage, avec un espacement de 3 à 4 m. Dans la partie centrale, l'espacement était de 2 m. Ces colonnes étaient installées dans des trous forés à partir de la crête du barrage. On prévoyait le forage de 503 trous de congélation dans le barrage, la prise d'eau et le déversoir. Le barrage devait être rempli par étapes jusqu'à sa hauteur totale. Selon les promoteurs, la construction du barrage devrait être terminée en moins de trois ans [9, 26].

Dans les faits, on a apporté de nombreux changements au cours de l'étape de la conception, et les travaux ont duré neuf ans. Pendant la construction, à cause de l'absence de bouclier de glace et d'une épaisse couverture de neige (jusqu'à 6 m), il était impossible de refroidir le barrage et ses fondations en hiver (contrairement à ce que prévoyaient les plans, la neige n'était enlevée qu'occasionnellement). De 1978 à 1981, le régime d'exploitation du premier réservoir a été perturbé parce qu'en été et en automne, le niveau de l'eau dépassait de 1 à 2 m la valeur normale, ce qui a causé l'apparition d'un niveau piézométrique élevé dans le barrage en construction, à 5 m au-dessus des fondations. On a exploité le barrage comme un ouvrage dégelé et le réchauffement a causé un dégel partiel des sols riches en glace des fondations.

Des études géophysiques et thermométriques ont montré que la largeur de la zone dégelée dans la partie du barrage formée par le canal atteignait 120 m et sa profondeur, de 7 à 10 m. En octobre 1980, la largeur de la zone dégelée avait atteint 200 m et sa profondeur, 14 m. Le dégel des matériaux terreux des fondations était accompagné d'une décompaction partielle, et des tassements sont apparus dans diverses parties du barrage. À l'intérieur de la zone dégelée, il y avait des sols d'une grande perméabilité.

stopped when the soil was frozen. Examination of the dam after 4 years of operation has shown a great number of cracks up to 50 m long and 3 cm wide due to thermokarst processes [5, 18] in the crest and along the edges of the upstream and downstream faces. Since the volume of the existing reservoir could not meet the power requirements of the region, a new dam was started which incorporated the former one.

The frozen type of the new dam was substantiated by the climatic and engineering-geocryological conditions in the area. According to the first alternative, a conventional dam with a core and key trench filled with loamy materials was suggested.

The final design modified after research and experimental studies provided for the construction of a homogeneous dam with rubble and pebble soils and a frozen shield [18, 19]. The shield cuts through the dam body and the ice-rich (permeable after thawing) soils of the foundation and deepens into the permafrost loam for 1-2 m. (Fig. 13b). The soil was placed on a natural foundation covered with peat. The peat was excavated for 0.5 m only in the central part of the foundation.

The soil was placed dry in the upstream and downstream shells of the dam; in the central part, it was placed in water ponds. The frozen shield was installed in the body and the foundation of the dam with seasonally operating steam-liquid refrigerating machines used for the first time in the national hydraulic engineering practice.

Refrigerating columns were located on the right and left abutments of the dam with a 3-4 m spacing. The spacing in the central part was 2 m. The columns were installed in boreholes drilled from the dam crest. It was anticipated to install 503 freezing boreholes in the dam, water intake and spillway. The dam was supposed to be filled by steps to the total height. According to the project representatives, the dam should have been constructed within three years [9, 26].

Actually, the construction was carried out with numerous changes to the design and lasted 9 years. An unfinished dam without a frozen shield and a thick snow cover (up to 6 m) excluded the possibility of cooling the dam and the foundation in winter (contrary to design provision the snow cleaning was fulfilled only from time to time). From 1978 to 1981, the regime of operation of the first reservoir was infringed because in the summer-autumn season, its level became 1-2 m higher than the normal water level and that led to the development of a high piezometric water level in the unfinished dam 5 m above the foundation. The dam was operated as a thawed structure and the warming effects led to a partial thawing of the ice-rich soils of the foundation.

The geophysical and thermometric surveys showed that the width of the thawed zone in the channel part of the dam reached 120 m and its depth 7 to 10 m. By October 1980, the thawed zone increased to 200 m in width and 14 m in depth. Thawing of the foundation soils was accompanied by partial decompaction and settlements appeared in various parts of the dam. Within the thawed zone, there were soils with a large permeability.

L'analyse thermique du sol gelant en présence de l'écoulement de percolation indiquait que l'espacement des appareils frigorifiques à la vapeur dans l'ancienne zone de talik devait être réduit par un facteur 2, c'est-à-dire de 2 à 1 m.

La création d'un bouclier de glace pourvu d'appareils frigorifiques à la vapeur, espacés d'un mètre le long du barrage en construction, a permis d'obtenir un regel total de la zone dégelée vers la fin de l'hiver 1982-83 et de conserver la zone gelée à une température de -2 à -5°C jusqu'à l'automne 1983. Plus tard, après la construction du barrage jusqu'à sa hauteur totale, l'espacement entre les trous forés du diaphragme gelé dans cette zone était d'un mètre.

Après l'hiver 1985-86, le régime de gel le long du front de pression correspondait aux valeurs nominales prévues, partout sauf pour la section du canal de fermeture. Les températures minimales dans le noyau gelé étaient comprises entre -15 et $-17,5^{\circ}\text{C}$, et les températures maximales, entre $-3,1$ et $-3,2^{\circ}\text{C}$. L'introduction tardive d'appareils frigorifiques à la vapeur dans le canal de fermeture a stimulé le processus de gel et de refroidissement de sols en abaissant la température à des valeurs comprises entre -2 et -3°C , plus élevées que les températures nominales prévues, et la largeur du bouclier de glace atteignait plus de 2 m. Dans la partie centrale du canal des eaux de percolation, les sols n'étaient pas gelés avant une profondeur de 3,5 à 4 m de la surface, et l'épaisseur de la zone dégelée atteignait 10 m. Pendant les forages pour l'installation des dispositifs à la vapeur, on a constaté qu'une partie des sols de la zone dégelée était sursaturée d'eau.

Pour cette raison, afin d'assurer la stabilité du barrage dans la zone du canal de percolation avant le remplissage du réservoir à son niveau nominal prévu, le massif de recharge aval a été recouvert de blocailles afin d'abaisser la pente à un rapport de 1 : 3, au lieu du rapport prévu de 1 : 2. Le gel de cette partie du barrage et de ses fondations à l'aide d'appareils frigorifiques à la vapeur était une condition essentielle pour obtenir le type de bouclier de glace requis [8, 19].

À l'automne 1986, on a observé plusieurs zones humides sur le massif aval du barrage, qui se sont interconnectées quand la distance entre les appareils frigorifiques à la vapeur est passée de 1 à 2 m (il y avait même une faible percolation d'eau des graviers à un débit d'environ 0,5 l/min).

Des mesures simultanées de la composition chimique de l'eau s'écoulant dans la partie inférieure de la pente et dans le réservoir ont donné des résultats semblables.

On a accordé une attention particulière aux fondations du déversoir, dans lesquels les températures dépassaient $-1,2^{\circ}\text{C}$ en septembre 1986, à une profondeur de 1,0 m sous la zone de contact avec le béton. En effet, à cette température, les sols pourraient être transformés en une masse plastique gelée, ou passer à l'état dégelé, ce qui pourrait causer l'apparition de percolation.

Au cours de l'hiver 1986-87, on a observé un refroidissement significatif du corps du barrage et des fondations à des températures comprises entre -7 et -13°C , accompagné d'un refroidissement du canal de fermeture pouvant atteindre de -4 à -6°C . Au cours de l'été de 1987, la température a gagné de 1 à 2 degrés, atteignant de -3 à -10°C dans la partie centrale du barrage et de -2 à -3°C dans le canal de fermeture. On a observé des zones dont les températures étaient

Thermal analysis of soil freezing in the presence of seepage flow indicated that the spacing of the steam-refrigerating devices in the former talik zone had to be reduced by two times that is from 2 to 1 m.

The creation of a frozen shield equipped with steam-refrigerating devices with 1 m spacing along the unfinished dam permitted to achieve a total freezing of the thawed zone by the end of the winter 1982-1983 and kept the zone frozen at a temperature of -2° to -5°C till the autumn of 1983. Later on, after the construction of the dam to its total height, the space between the boreholes of the frozen diaphragm in that zone was 1 m.

After the winter 1985-1986, the freezing regime along the head front corresponded to the design everywhere except for the closure channel section. Minimal temperatures in the frozen core were -15° to -17.5°C and maximal ones were -3.1° to -3.2°C . Late introduction of steam-refrigerating devices in the closure channel stimulated freezing and cooling of soils to -2° to -3°C , that is above the design temperatures and the width of the frozen shield was over 2 m. In the central part of the seepage channel, the soils were not frozen for a depth of 3.5-4 m from the surface. The thickness of the thawed zone reached 10 m. It was found out during the boring for steam-generating devices, that part of the soils in the thawed zone was in a liquid oversaturated state.

So in order to provide stability of the dam in the seepage channel zone before filling the reservoir to the design level, the downstream shell was loaded with rock to flatten the slope to a ratio of 1:3 instead of the design 1:2. The freezing of that part of the dam and its foundation using the steam-refrigerating devices was an obligatory provision for providing the required frozen shield [8, 19].

In the autumn of 1986, several "wet" zones were observed on the downstream slope of the dam, which were connected with the distance between the steam refrigerating devices changed from 1 to 2 m (there was even a low seepage of water from the gravels with about 0.5 l/min discharge).

The chemical composition of water leaking in the lower part of the slope and in the reservoir sampled simultaneously was similar.

A special attention was devoted to the spillway foundation, where in September 1986 at a depth of 1.0 m from the contact with the concrete, the temperature was above -1.2°C . The soils could be transformed to a plastic-frozen or a thawed state at that temperature and that situation lead to the development of seepage.

A significant cooling of the dam body and the foundation to temperatures of -7° to -13°C was reported in the winter of 1986-1987 accompanied by a cooling of the closure channel down to -4° to -6°C . In the summer of 1987, the temperature increased by 1 to 2 degrees becoming -3° to -10°C in the central part of the dam and -2° to -3°C in the closure channel. Zones with temperatures of -0.5° to -0.9°C were observed at a depth of 3 to 5 m (Fig. 14b). Within these zones, the soils could also be

comprises entre $-0,5$ et $-0,9$ °C à une profondeur de 3 à 5 m (Fig. 14b). À l'intérieur de ces zones, les sols pourraient aussi être dégelés ou à l'état de masses plastiques gelées, et devenir légèrement perméables. L'examen du barrage à la fin de 1987 a indiqué qu'il n'y avait pas de points d'eau liquide dans le massif aval.

L'expérience de la construction et de l'exploitation des barrages dans les zones cryolitiques a montré que des affaissements peuvent se produire aux points de contact entre divers éléments, par exemple entre le corps du barrage et les fondations ou les culées de la rive, entre le barrage et les ouvrages en matériaux non terreux, par exemple certains éléments synthétiques imperméables des déversoirs et des prises d'eau.

Des observations continues des températures au barrage d'Anadyrskaja et au cours d'études sur place et en laboratoire, effectuées par B. E. Vedenev (VNIIG), ont mis en évidence des températures supérieures aux valeurs nominales prévues dans certaines parties du barrage, ce qui causait l'apparition de zones anormalement chaudes dans le système fondations-barrage (Fig. 14b), près du déversoir et ainsi, l'écoulement d'eaux de percolation près des fondations et près de la prise d'eau était accompagné par la formation de fractures longitudinales dans le massif de recharge amont, qui pourraient favoriser la formation de blocs potentiellement instables dans la face amont du barrage, près de la prise d'eau.

Afin de prévenir le développement de processus géocryologiques, on a pris des mesures visant à assurer le fonctionnement en continu des appareils frigorifiques à la vapeur pendant l'hiver, avec une attention particulière aux zones du déversoir et de la prise d'eau. Il a aussi été suggéré d'organiser l'enlèvement de la neige qui s'accumule sur les évaporateurs des appareils frigorifiques. Si ces mesures devaient s'avérer insuffisantes, on a recommandé l'installation d'appareils frigorifiques à la vapeur supplémentaires dans ces zones [17].

6.1.2. Barrage d'Irelyakhskaja

Le projet de barrage sur la rivière Irelyakh prévoit la construction d'un barrage en matériaux meubles de 12 m de hauteur, avec un noyau de terre gelée, un déversoir, une station de pompage en amont et un déversoir de type siphon (Fig. 15a). Il est situé dans la zone de pergélisol continu, près du village de Mirniy, où la température de l'air peut descendre à -60 °C en janvier et atteindre 30 °C en juillet [5, 6, 15].

Les fondations sont constituées de marnes et de marnes argileuses, avec des intercouches de dolomite et de calcaire de 0,5 à 0,8 m d'épaisseur. La roche est plutôt fortement fissurée jusqu'à une profondeur de 40 m, et ces fissures sont remplies de veines de glace de 0,5 à 8 cm d'épaisseur.

Le substrat rocheux est recouvert de dépôts alluviaux, comme des sols de gravier et de galets remplis de sable dans le lit de la rivière, et de loams poudreuses dans la plaine inondable et dans l'une des terrasses de cette plaine. La teneur en glace des loams de la plaine inondable est de 60 % et celle des loams de la terrasse, de 90 %. On trouve de la glace sous forme de lentilles et de lits de 1 à 500 mm d'épaisseur. On signale la présence de glace broyée sous la tourbe dans certains secteurs. La température du sol est de -4 °C à 10 m de profondeur.

thawed or plastic-frozen and become slightly permeable. Examination of the dam at the end of 1987 indicated no water spots on the downstream slope.

Experience of dam construction and operation in cryolitic zones has shown that failures occur in the zones of a contact between various elements such as the body of the dam and the foundation or the bank abutments, the dam and the non-soil structures such as spillways impervious synthetic elements and water intakes.

Continuous temperature observations made at Anadyrskaya dam and field and laboratory studies performed by B.E. Vedeneev VNIIG have shown temperatures beyond design values in some parts of the dam bringing abnormally warm zones in the foundation-dam system (Fig. 14b) close to the spillway with seepage flow near the foundation and near the intake accompanied by the formation of longitudinal cracks in the upstream shell, which could be responsible for potentially unstable blocks on the upstream face of the dam near the intake structure.

In order to prevent the development of geocryological processes, measures were taken to provide a continuous operation of the steam-refrigerating devices during winter with a special attention to the zones of the spillway and the water intake. It was also suggested to organize snow removal from the evaporators of the steam-refrigerating devices. If those measures proved insufficient, it was recommended to install additional steam-refrigeration devices in those zones [17].

6.1.2. Irelyakhskaya Dam

The hydraulic project on the Irelyakh river incorporates an embankment dam, 12 m high, with a frozen earth core, spillway channel, an upstream pumping station and a siphon spillway (Fig. 15a). It is located in the zone of continuous permafrost near Mirniy town where the air temperature can reach -60°C in January and $+30^{\circ}\text{C}$ in July [5, 6, 15].

In the foundation, there are marls and clayey marls with interbeds of dolomite and limestone 0.5 to 0.8 m thick. The rock is rather heavily cracked down to a depth of 40 m and the cracks are filled with ice veins 0.5 to 8 cm thick.

The bedrock is covered by alluvial deposits, represented by gravel-pebble soils with a sand filler in the river channel and dusty loams in the floodplane and one of the floodplane terraces. The ice content in loams of the floodplane is 60% and in loams of the terrace 90%. Ice occurs as 1-500 mm thick lenses and beds. Ground ice is recorded under the peat in some areas. The soil temperature at 10 m depth is -4°C .

Le déversoir fait 700 m de longueur par 40 m de largeur à la base, avec des pentes de 1 V : 2 H, et il est constitué de plaques de béton armé placées sur un nivellement de blocs.

Le long de la route du déversoir située sur la deuxième terrasse de la plaine inondable de la rive gauche, le substrat rocheux est représenté par une surcouche dense de marnes, de marne argileuse, de calcaires argileux, de grès calcaireux et de dolomites fortement fissurés. Les joints sont surtout verticaux et horizontaux, avec des ouvertures pouvant atteindre 20 mm. Ils sont remplis par des matières terreuses dans les horizons supérieurs et par de la glace dans la zone sous-jacente ; parfois, ils sont vides.

Dans la partie de l'entrée, le canal a une pente arrière et il s'étend dans des loams diluviens, sans couper les loams ou décaper la roche. La section horizontale du canal et la section en pente pénètrent jusqu'à 10 m profondeur dans le substrat rocheux (Fig. 15c).

Le fond du canal et les pentes sont renforcés par des plaques de béton placées sur une couche de blocailles de 0,4 m d'épaisseur, sans dispositifs imperméables. Le renforcement du canal a permis de tolérer une percolation tout le long du canal, sans protection contre le dégel pour le sol gelé en permanence. Sous la principale structure du déversoir, on a construit une clé de sol loameux de 3,7 m de profondeur sur toute la largeur du canal. On a mis en place un système de congélation dans la tranchée, comportant quatre canalisations horizontales dont chacune est pourvue d'un ventilateur qui souffle de l'air froid. La partie supérieure de la clé, située plus bas que la couche de blocailles sous les plaques de renforcement, n'obstruait pas l'écoulement du percolation.

On a installé un système de congélation à colonnes d'air verticales le long du rebord droit du canal.

Ainsi, les roches fracturées du lit et des parois du canal n'étaient pas protégées par une couche imperméable et l'écoulement de percolation le long de la couche de blocailles sous les dalles de béton pénétrait dans la roche fissurée autour et au-dessus de la tranchée parafouille, pourvue de tubes de congélation horizontaux.

Ce modèle tenait compte des effets thermiques des petites percolations et des petits volumes d'eau ; il permet de tolérer le percolation au-dessus de la couche de blocailles.

Plusieurs années après le début de l'exploitation, on a découvert une zone de talik de 10 m d'épaisseur (d'une température pouvant atteindre 20°C) dans les fondations de la culée gauche, sous le déversoir. Cette zone de talik s'était formée à cause de la pénétration d'eau relativement chaude le long du déversoir, qui s'écoulait ensuite dans la roche fracturée en passant par les joints entre les plaques de béton. Le drainage de l'eau par les fractures jusqu'aux eaux de fuite a permis l'assèchement de la zone dégelée pendant l'hiver. L'été suivant, le dégel recommençait à la profondeur atteinte pendant la saison chaude antérieure.

L'examen du profil de répartition de la zone dégelée sous le déversoir indiquait que cette zone de talik a commencé à se former dans la zone de l'interface, entre le bouclier de glace et la rive gauche du canal (Fig. 15b). Il était clair que la cause de la percolation était l'élimination du substrat rocheux fracturé et la formation de

The spillway channel is 700 m long and 40 m wide at the base with slopes of 1 V:2 H and is lined by reinforced concrete plates placed on a rubble grading.

Along the route of the spillway channel located on the second floodplane terrace of the left bank, the bedrock is represented by dense overbedding of heavily fissured marls, marl clays, clayey limestones, calcereous sandstones and dolomites. The joints are predominantly vertical and horizontal, with up to 20 mm openings. The joints are filled by soil material in the upper horizons and with ice in the zone lying below, sometimes the joints are hollow.

At the inlet portion, the channel has a back slope and extends in deluvial loams, without cutting the loams or stripping the rock. The channel horizontal section and drop section are cutting into the bedrock to 10 m depth (Fig. 15c).

The channel bottom and slopes are reinforced by concrete plates placed over a 0.4 m thick rubble layer, with no impermeable arrangements. The channel reinforcement permitted water seepage along the whole channel length, with no protection of perennially frozen soil from thawing. Under the main spillway structure, a 3.7 m deep loamy key was constructed across the channel. A freezing system was placed in the trench with its four horizontal pipes and fans for injecting cold air into the pipes. The upper part of the key proved to be lower than the rubble layer underlying the reinforcement plates and therefore did not obstruct the seepage flow.

A freezing system with vertical air columns was installed along the right edge of the channel.

Thus the fractured rocks of the bed and sides of the channel were not protected by any impervious layer and seepage flow moving along the rubble layer under the concrete slabs penetrated in the cracked rock around and above the key trench equipped with the horizontal freezing tubes.

The design provided for small seepage losses and small water heating effects. Seepage above the rubble layer was allowed.

Several years after the beginning of the operation, a talik zone 10 m thick (with a temperature up to 20°C) was discovered in the foundation of the left abutment under the spillway channel. The talik formed as a result of the penetration of warm water moving along the channel and entering the fractured rock through joints between the concrete plates. The water drained along the fractures to the tailwater leaves the thawed zone in a drained state for the winter. The next summer, thawing begins at the depth reached during the previous warm season.

The examination of the distribution pattern of the thawed zone under the spillway channel indicated that the talik had originated in the zone of interface between the frozen shield and the left bank of the channel (Fig. 15b). The removal of fractured bedrock and the formation of new fractures by blasting when digging a

nouvelles fractures par dynamitage, au cours du creusement de la tranchée destinée à créer le bouclier prévu sur la rive gauche. Cette percolation s'est accélérée par la suite sur une surface croissante, et pour cette raison, le bouclier de glace mal développé s'est avéré pratiquement incapable d'empêcher le dégel.

L'expansion du talik s'est arrêtée après l'injection de coulis dans les sols et la roche dégelés et la formation d'un bouclier empêchant la percolation autour du périmètre du canal.

On a observé la même situation dans le cas du bouclier de glace le long du côté droit du canal, dont la partie arrière, qui représente environ 40 % de la longueur totale, s'est retrouvée plus ou moins en porte-à-faux, parce que le talik était dégelé sous celui-ci jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 15 m (Fig. 15b). Le bouclier de glace ne remplissait sa fonction que dans la partie amont du côté droit du canal.

Il faut aussi noter qu'on a observé une déformation des murs de chute à cause du dégel de sols des fondations, dans la section en pente abrupte, qu'on expliquait par le fait qu'une partie des fondations des pieux était déjà dans la zone des températures positives. Pendant l'exploitation, on a observé des tassements des dalles de béton sur le lit du canal dans certaines zones, à cause du dégel de sols riches en glace.

La présence d'une couche loameuse sur le substrat rocheux fissuré de l'entrée du canal interrompait la connexion hydraulique du réservoir du côté aval et protégeait les fondations du canal d'un dégel complet, ce qui a empêché la destruction du bouclier de glace.

Pour éliminer le risque de dégel du barrage et de ses fondations, on a injecté du coulis dans les zones dégelées, et on a cimenté les joints entre les plaques de béton.

Pendant la restauration du déversoir, on a coulé un mur d'exutoire en béton armé pourvu d'un diaphragme en béton à une plus grande profondeur sous la surface du pergélisol, à l'entrée du canal. On a installé un système frigorifique à liquide et à siphons thermiques le long de l'axe du mur, ainsi que d'autres systèmes frigorifiques du même type des deux côtés du canal, à leur point de connexion avec les colonnes réfrigérantes à air situées dans le barrage.

L'expérience de l'exploitation du déversoir a montré que lorsque des déversoirs de type dégelé sont placés sur des roches fissurées gelées, il faut construire des couches imperméables à l'intérieur du périmètre humide du profil du canal pour empêcher la percolation dans les fondations pendant les crues [5, 6, 22].

6.1.3. Barrage de la rivière Myaundja

Ce barrage en matériaux meubles de type gelé, construit sur la rivière Myaundja, mesure 11,5 m de hauteur par 870 m de longueur. Il a été construit entre 1952 et 1959, afin de créer un bassin de refroidissement pour la centrale thermique qui lui est associée [5, 6, 22].

Les fondations du barrage sont formées par des couches de basalte, d'andésite et de basalte andésitique altérés d'une perméabilité de 10 m/jour, recouvertes d'un lit de gravier et de galets alluviaux, d'une épaisseur de 1, 2 à 4 m et d'une perméabilité de 350 à 500 m/jour. Il y a des occurrences locales de lits de tourbe et

trench for the shield in the left bank evidently became the reason for water seepage. This seepage subsequently accelerated, covering an expanding area, therefore an insufficiently developed frozen shield proved practically incapable of obstructing the development of thawing.

The expansion of the talik was stopped after grouting of the thawed soils and rock and the creation of a seepage preventing shield around the channel perimeter.

The same situation was observed with the frozen shield along the right side of the channel - its tail portion covering about 40% of the total length became more or less hanging. The talik material was thawed under it down to 15 m in thickness (Fig. 15b). The frozen shield did fulfil its task only in the upstream portion of the right side of the channel.

It should also be noted that there was observed deformation of the drop walls due to the thawing of soils in the foundation in the steep drop section, assumingly explained by the fact that a part of the pile foundation was already in the zone of positive temperatures. Settlements of concrete slabs on the channel bed were observed in some zones during operation due to the thawing of ice-rich soils.

The presence of a loamy blanket on the cracked bedrock of the entrance part of the channel interrupted the hydraulic connection of the reservoir to the downstream side and protected the channel foundation from a complete thawing preventing the destruction of the frozen shield.

To remove the hazard to have a thawing of the dam and its foundation, the thawed zones were grouted, and the joints between the concrete plates cemented.

A reinforced concrete outlet wall with its concrete diaphragm was deepened below the top of the permafrost in the channel entrance during the rehabilitation of the spillway. A refrigerating system of liquid thermal-siphons was installed along the axis of the wall. Additional refrigerating systems of the same type were installed on both sides of the channel to their connection with the air refrigerating columns located in the dam.

The operation experience of the spillway channel has shown that when the thawed-type spillway channels are placed on frozen fissured rocks, impervious blankets should be constructed within the wet perimeter of the channel profile to prevent seepage into the foundation during flood flows [5, 6, 22].

6.1.3. Dam on Myaundzha River

The embankment dam of the frozen type on Myaundzha river is 11.5 m high and 870 m long. It was built between 1952 and 1959 to create a cooling pond for the associated thermal power plant [5, 6, 22].

Weathered basalt, andesite and andesite-basalt with a permeability of 10 m/day covered with a 1.2 to 4 m thick bed of alluvial gravel and pebbles with a permeability of 350 to 500 m/day form the foundation of the dam. There are local occurrences of 1 m thick beds of peat and loamy sands on the pebble bed of the

de sols ou de sables loameux d'un mètre d'épaisseur dans le lit de galets de la plaine inondable. Les versants de la vallée sont recouverts d'une couche de loams à blocailles diluviens de 4 à 5 m d'épaisseur. Les sols sont glacés et il y a des masses de glace veinée en forme de coin dans certains secteurs (Fig. 16a). Sous le lit du cours d'eau et sur la rive gauche, il y a une zone de talik de 218 m de largeur, qui traverse l'axe du barrage (Fig. 16b).

Il y a un évacuateur en béton le long de la rive gauche. Ses fondations reposent sur des roches fortement fissurées, à capacité portante très réduite et à perméabilité accrue en cas de dégel. Néanmoins, la conception ne prévoyait ni injection de coulis, ni bouclier de glace.

Pour congeler le noyau du barrage et le talik dans ses fondations, on a mis en place 494 colonnes réfrigérantes à l'air le long de la crête du barrage, jusqu'à une profondeur de 1 à 2 m dans la roche. L'espacement entre les colonnes est de 1,5 m dans la zone de talik et de 2,0 m à l'extérieur de celle-ci. Les trous forés pour les colonnes font 16 à 24 m de longueur.

Les canalisations de petit diamètre n'ont pu fournir le volume requis de frigorigène (de l'air froid). À cause de la mauvaise qualité du réseau de canalisations, il y a eu des fuites de saumure par des joints non étanches, qui ont empêché le gel du sol et de la roche.

Une année après le début du remplissage du réservoir, alors que la tête d'eau était égale à environ la moitié de sa valeur, on a découvert une zone de percolation en progression dans le talik, sous le déversoir en béton, qui causait une expansion de la zone de sol dégelé en direction du barrage.

Pour empêcher une rupture, on a injecté du coulis dans la roche des fondations de l'évacuateur et de l'appui. On a construit un tablier d'argile de 0,3 à 0,5 m d'épaisseur au niveau de l'évacuateur, se transformant en une zone filtrante au niveau du lit de la rivière.

Après plusieurs années, à cause du réchauffement du barrage en matériaux meubles par l'évacuateur adjacent, une zone de dégel est apparue dans les fondations du barrage, et elle a commencé à s'étendre entre les stations 0 et 1. C'est pourquoi on a construit un bouclier de glace transversal au niveau de la station 2, et un bouclier longitudinal entre les stations 0 et 2. On a aussi installé, dans les sols des fondations et du barrage, des colonnes réfrigérantes fonctionnant de façon saisonnière.

Le processus de dégel des fondations s'est arrêté seulement après l'installation d'un système frigorifique à la saumure à deux rangs, fonctionnant en permanence. On a installé le deuxième rang de colonnes réfrigérantes à deux mètres du premier. On a également mis en place un rideau d'injections en profondeur, dans les fondations du déversoir et les fondations dégelées du barrage en matériaux meubles, sous le bouclier de glace. Ce dispositif a contribué à réduire le débit et le volume d'écoulement de percolation et a créé un bouclier de glace continu dans les fondations du barrage. Toutefois, au début de 1962, les températures mesurées dans l'ouvrage ne s'étaient stabilisées que dans les zones sans percolation. La Fig. 16b montre la position de l'isotherme de zéro dans les fondations de l'ouvrage huit ans après le début de l'exploitation.

floodplane. The sides of the valley are covered with 4 to 5 m thick deluvial rubble loams. The soils are iced and there are some wedge-veined ice in some areas (Fig. 16a). Under the riverbed and its left side, there is a talik 218 m wide crossing the dam axis (Fig. 16b).

A concrete spillway is located along the left bank. Its foundation is underlaid by heavily fissured rocks with a significantly reduced bearing capacity and an increased permeability if thawing takes place. Nevertheless neither grouting nor frozen shield were provided by the design.

To freeze the core of the dam and the talik in its foundation, 494 air refrigerating columns were installed along the dam crest down to 1 to 2 m into the rock. The space between the columns is 1.5 m in the talik section and 2.0 m outside. The boreholes for the columns are 16 to 24 m long.

Small diameter pipes failed to provide the required volume of cooling agent (air). Due to the poor quality of the piping system, the brine escaped through the loose pipe joints and prevented soil and rock freezing.

A year after the reservoir filling started when the head was about half the full head, a seeping talik zone was discovered under the concrete spillway. Seepage was progressing and the thawed soil zone was expanding towards the dam.

To prevent failure, grouting work was carried out in the rock of the spillway foundation and abutment. A 0.3 to 0.5 m thick clay apron was constructed at the spillway section transforming in a filter in the riverbed section.

After several years, due to the warming influence of the concrete spillway adjacent to the embankment dam, a thawed zone appeared in the dam foundation which began to spread from station 0 to station 1. That is why a transverse frozen shield was arranged at station 2 and a longitudinal shield was built from station 0 to station 2. Seasonally acting refrigerating columns were installed in soils of the foundation and the dam.

The process of foundation thawing was stopped only after the installation of a double row of a permanently operating brine refrigeration system. The second row of refrigerating columns was mounted two meters away from the first row. A deep grout curtain through the foundation of the spillway and the thawed foundation of the embankment dam below the frozen shield was also carried out. This arrangement contributed to a reduction of the rate and the discharge of the seepage flow and created a continuous frozen shield in the dam foundation. However, by the beginning of 1962, field temperatures of the structure had become stable only in the zones without seepage. The position of the zero isotherm in the foundation of the structure 8 years after the beginning of operation is shown in Fig. 16b.

Au cours des années 1970, on a construit une berme protectrice en amont de 30 m de largeur le long du barrage, après l'entrée en service des nouvelles unités de la centrale thermique, afin de réduire l'effet de réchauffement dû au rejet d'eau très chaude.

Pendant le forage des trous en 1985 pour installer un deuxième bouclier de glace, de l'eau est apparue en aval, ce qui indiquait le développement d'une zone dégelée dans les fondations du barrage.

On a observé des écoulements abondants au pied du massif aval 1,5 à 2 jours après la fin du forage, suivis par une forte diminution du débit de percolation, qui s'est stabilisé à environ 0,5 l/s par mètre de longueur du barrage.

Pendant les travaux de forage, on a découvert des zones locales de sol dégelé dans la partie inférieure du noyau et dans les fondations, sur toute la longueur du barrage.

Les travaux de réparation prévoyaient notamment la restauration du système frigorifique à l'air, dans lequel on avait trouvé des bouchons de glace et divers dommages, et la mise en service des colonnes de congélation à saumure prévues pour la deuxième étape.

Toutefois, le processus de dégel de barrage et des fondations s'est poursuivi. L'analyse des relevés géophysiques et thermométriques des années 1988 à 1990 a montré que le barrage évoluait dans des conditions géocryologiques complexes (Fig. 16c) caractérisées par l'apparition de vastes zones de talik jusqu'à une profondeur de 40 m, ainsi que de nombreux points de percolation dans l'ensemble du barrage et des fondations. En vue des travaux de restauration du barrage, notamment dans le contexte d'une activité sismique accrue à ce site, on a réalisé une analyse de la stabilité sismique du barrage qui prenait en compte un certain nombre de variables de la structure géocryologique du barrage et de ses fondations. On a constaté que la meilleure solution assurant la sécurité sismique prévoyait que les parties du barrage adjacentes aux appuis et aux versants de la vallée seraient gelées, alors que le reste du barrage et ses fondations seraient dégelés. Compte tenu du fait qu'une partie significative du barrage et des fondations était dégelée à ce moment, on a proposé de construire un rideau d'injections dans les fondations du barrage, avec un gel subséquent des zones d'appuis et leur maintien à l'état gelé par un équipement frigorifique fonctionnant de façon saisonnière pendant toute la période de l'exploitation [6, 11, 12, 17].

6.1.4. Barrage de la Rivière Taatta

On a construit un barrage sur la rivière Taatta (République de Saha) avec les matériaux terreux extraits du canal de l'évacuateur. Ce dernier était équipé d'une écluse de 15 m de largeur sur la rive gauche, à 40 m de l'entrée, à faible niveau d'eau dans sa partie supérieure. Pendant la première crue avec une charge de pression de 1,5 m, l'érosion a commencé sous la culée de la rive droite, puis, elle s'est étendue sous le bassin de dissipation, ce qui a entraîné la destruction de la sortie du déversoir et du barrage.

Ce désastre est dû au dégel des sols glacés, qui a provoqué des tassements irréguliers des fondations. Pendant le creusement d'une tranchée au pied du

A protective upstream berm 30 m wide was built along the dam length in the seventies after the commissioning of new power units of the thermal power plant to reduce the warming influence of overheated water.

Drilling of boreholes was carried out in 1985 to install a second frozen shield, when water appeared downstream indicating the development of a thawed zone in the dam foundation.

Abundant water outflows were observed at the toe of the downstream slope 1.5-2 days after the end of drilling, followed by a sharp decrease in the seepage flow rate which stabilized around 0.5 l/s per linear meter of the dam length.

During drilling works, thawed soil was discovered locally in the lower part of the core and in the foundation over the whole length of the dam.

Repair works included restoration of the air refrigerating system, which had ice plugs and various damages, and starting operation of the freezing columns of the second stage which were operating with brine.

However the process of dam and foundation thawing continued. The analysis of geophysical and thermometrical studies in years 1988-1990 showed that the dam was evolving under complicated geocryological conditions (Fig. 16c) which are characterized by the development of vast talik zones down to 40 m in depth and numerous seepage spots through the dam body and foundation. To substantiate the dam rehabilitation, particularly due to an increased seismic background at the site, an analysis of the seismic stability of the dam was fulfilled taking into account a number of variants of geocryological structure of the dam and foundation. The best variant for seismic safety was found to be an alternative where parts of the dam adjacent to abutments and the sides of the valley are frozen, and the rest of the dam and foundation are thawed. Taking into account that a significant part of the dam and foundation was thawed at this time, it was proposed to build a grout curtain in the foundation of the dam with subsequent freezing of the abutment zones and their maintenance in a frozen state with seasonally acting refrigerating equipment during the full period of operation [6, 11, 12, 17].

6.1.4. Dam on Taatta River

A dam on Taatta river (Saha Republic) was constructed using the soils excavated from the spillway channel. The spillway channel was equipped with a 15 m wide water lock on the left bank located 40 m from the inlet. The top of the water lock is at a low water level. During the first flood flow with a head of 1.5 m, erosion started under the right bank abutment and then expanded under the stilling basin. The spillway outlet channel and dam were destroyed.

The failure was the result of the thawing of the icy soils which lead to irregular settlements of the foundation. During the excavation of a trench at the toe, some

barrage, on a trouvé un certain nombre d'intercouches de glace de 15 à 20 cm d'épaisseur, mais on n'a pris aucune mesure pertinente pour leur élimination. La percolation a commencé après le remplissage du réservoir à cause du dégel du sol. Un échange thermique par convection a accéléré le dégel, ce qui a provoqué des tassements non uniformes. Cette grave défaillance est due à une mauvaise évaluation des conditions techniques et géologiques, ainsi qu'à des erreurs pendant la conception et la construction [42].

6.1.5. Barrage du ruisseau Pevek

On a construit un barrage sur le ruisseau Pevek, sur le rivage de l'océan Arctique. Cet ouvrage de 21,5 m de hauteur et de 464 m de longueur a été construit avec un mélange de blocs et des galets rempli de sable et de loam sableux. On a assuré l'imperméabilité du noyau à l'aide d'un système frigorifique à l'air constitué d'un rang de 210 colonnes espacées de 2 m, enfoncées à 6-20 m dans les fondations (Fig. 17).

Les fondations du barrage sont composées d'argiles litées à une profondeur de 2 à 8 m sur le talus de la rive gauche, et de 8 à 30 m sur celui de la rive droite.

La roche est recouverte de blocailles et de galets, avec des blocs et du loam sableux formant un filtre. Il y a des lentilles de loam sableux sur le talus de la rive droite, avec très peu de blocailles et de galets.

Il y a des lentilles de glace enfouies jusqu'à 1,5 m d'épaisseur tout le long de l'axe, et plus particulièrement sur la rive droite du ruisseau. La teneur en glace est comprise entre 13 et 97 %. Il n'y a presque pas de talik sous le lit du ruisseau, et ce dernier gèle complètement en hiver.

L'exutoire est constitué de deux tuyaux de 250 mm de diamètre placés dans une tranchée creusée à 3 m sous le barrage. Celle-ci a ensuite été remplie de béton, et l'espace étroit entre le béton et la tranchée, rempli de sable, mais ce dernier n'a pas été suffisamment compacté.

Trois ans après le début de l'exploitation à la fin de l'été, il y a eu un lessivage des matériaux du barrage le long des canalisations de l'exutoire. On a découvert l'existence d'une percolation lors de l'inondation du puits où sont situées les vannes de régulation des canalisations de l'exutoire de fond, au niveau de la face aval du barrage. En moins de six jours, une dépression conique de 6 m de diamètre et de plus de 1 m de profondeur est apparue dans le batardeau reliant la tour de la prise d'eau au barrage, et la percolation près du puits de la salle de commande s'est accrue notablement. Au cours des sept jours qui ont suivi, le lessivage dans le corps du barrage a creusé un tunnel qui s'est agrandi rapidement, et dont l'ouverture a bientôt atteint 40 m². Le réservoir a perdu environ 73 % de sa capacité de stockage.

La principale raison de cette défaillance est la percolation du réservoir occasionné par un mauvais contact entre le béton dans la tranchée et les matériaux du barrage, qui s'est accru notablement à cause de la dégradation des zones de gel du barrage.

L'été suivant, le canal d'érosion a été colmaté à l'aide d'un diaphragme en béton armé, relié au béton de la prise d'eau, et la fosse ouverte a été remplie de

interlayers of ice 15-20 cm thick were found, but relevant measures for removal of such materials were not taken. Seepage began after reservoir filling due to soil thawing. Due to convective heat exchange, thawing increased and was accompanied by non-uniform settlements. The failure was the result of an inadequate assessment of the engineering-geological conditions and errors during design and construction [42].

6.1.5. Dam on Pevek Brook

Pevek Brook dam was built on the shore of the Arctic Ocean. The dam is 21.5 m high and 464 m long and built with rubble and pebble materials with sand and a sandy loam filling. The imperviousness of the core was created with the help of an air refrigerating system consisting of a row of 210 columns deepened 6 to 20 m into the foundation at a 2 m spacing (Fig. 17).

The foundation of the dam is composed of clay shales located at a depth of 2 to 8 m on the left bank slope and of 8 to 30 m on the right one.

The rock is covered with rubble and pebble materials with blocks and a sandy loam filter. There are sandy loam lenses on the right bank slope with rare rubbles and pebbles.

There are lenses of buried ice up to 1.5 m thick all along the axis, especially on the right bank of the brook. The ice content varies from 13 to 97%. There is almost no talik under the riverbed and the brook freezes to the bottom in winter.

The water outlet structure consists of two pipelines 250 mm in diameter placed in a 3 m trench under the dam. The trench was subsequently filled with concrete. The narrow spaces between the concrete and the trench walls were filled with sand, but not sufficiently compacted.

Three years after the beginning of operation at the end of the summer, there was a washout of the dam materials along the water outlet pipes. The seepage was discovered when the well where are located the pipe control valves of the bottom outlet at the downstream face of the dam was filled with water. Within 6 days a conic depression 6 m in diameter and over 1 m deep appeared in the cofferdam connecting the water intake tower with the dam and the seepage near control chamber well increased significantly. In the next seven days, the washout in the dam body took the form of a tunnel with swiftly increasing dimensions which soon achieved 40 m². The reservoir lost about 73% of its storage.

The main reason for the failure was water seepage from the reservoir due to a loose contact between the concrete in the trench and the dam material, which significantly increased due to degradation of the frozen zones of the dam.

The summer after, the erosion channel was closed with a reinforced concrete diaphragm, which was connected to the concrete prism of the water intake and the

loam sableux contenant des galets et des blocailles compactés couche par couche. La partie reconstruite a gelé pendant l'hiver, mais il a fallu trois hivers pour atteindre la température nominale prévue pour le bouclier de glace [5, 6, 22].

6.1.6. Barrage de la rivière Dolgaya

Le barrage de la rivière Dolgaya, construit près de Norilsk [5, 22], mesure 10 m de hauteur et 130 m de longueur.

Les fondations du barrage sont composées de loams sableux morainiques reposant sur des loams, près du versant gauche de la vallée, et de loams graveleux près du versant droit. Tous les sols sont saturés de glace et sur le site du barrage, la profondeur du talik sous le lit du cours d'eau atteint de 3 à 3,5 m.

Le barrage de type gelé est fait de sable, avec un noyau d'argile et de béton, connecté à une tranchée parafouille de 3,6 m de profondeur remplie avec ces mêmes matériaux, qui pénètre dans la sous-couche de matériaux terreux dégelés. Il y a une couche interne de loam avec une petite tranchée parafouille, d'argile-béton à la base de la pente, sous le massif de recharge amont. De plus, il y a une couche d'enrochement de 0,2 m d'épaisseur sur la face amont, et une couche de tourbe de 0,4 m d'épaisseur portant un double revêtement sur la face aval (Fig. 18a).

Il y a un bouclier de glace dans le corps et les fondations du barrage, sur toute la longueur de la tête d'eau.

Pendant les deux premières années, le sol a été congelé à l'aide d'une solution de chlorure calcium refroidie par l'air ambiant. Cette solution était ensuite injectée dans 48 colonnes jusqu'à une profondeur de 7 à 15 m, enfoncées à 2 m dans les fondations. Les colonnes étaient disposées sur deux rangs, l'un le long de l'axe du noyau, l'autre 10,5 m plus vers l'aval. Ce système s'est avéré insatisfaisant à cause d'un refroidissement inadéquat de la saumure (sa température dépassait celle de l'air de 15 à 20°C) et à cause de fuites dans le sol dues à la corrosion des tuyaux. Étant donné que le sel brut était sale, il s'est précipité au fond des colonnes et sur les parois des tuyaux, ce qui a réduit le transfert thermique par convection à partir du sol et causé parfois la formation de bouchons dans ceux-ci. Le massif aval du barrage n'a pas gelé naturellement comme prévu parce qu'il était recouvert d'une couche de neige de 4 m d'épaisseur, un bon isolant thermique.

Après une année d'exploitation, des fuites sont apparues sur la pente aval en été. Deux zones dégelées de 50 et de 8 m² de section transversale sont apparues dans la partie du barrage sur le lit de la rivière (Fig. 18b). La température de ces zones pouvait atteindre 0,3°C, et des particules étaient transportées par la percolation.

Pour empêcher l'apparition de suffosion, on a remplacé le système frigorifique en place par un système de refroidissement à l'air aspirant.

Pour empêcher l'aspiration de neige avec l'air, on a construit une galerie en bois avec des traverses au-dessus des colonnes.

Fonctionnant à une température atmosphérique inférieure à -10°C pendant les premières années d'exploitation, le système frigorifique a permis d'abaisser la température dans le corps du barrage dans la plage de 0 à 0,5°C. Toutefois, ce n'est

open excavation was filled with sandy loam containing pebbles and rubbles compacted layer by layer. The reconstructed part was frozen during the winter but the design temperature conditions of the frozen shield was obtained after 3 winters [5, 6, 22].

6.1.6. Dam on Dolgaya River

The dam on Dolgaya River was built near Norilsk [5, 22]. It is 10 m high and 130 m long.

The foundation of the dam is composed of morainic sandy loams underlaid by loams near the left side of the valley and gravel loams near the right side. All the soils are ice saturated and the depth of the talik under the riverbed is 3 to 3.5 m at the dam site.

The dam is of the frozen type. It is constructed of sand with a clay-concrete core, connected to a key trench 3.6 m deep filled with the same material and penetrating through the underbed thawed soil. There is an internal blanket of loam with a small key trench of clay-concrete at the base of the slope under the upstream shell. There is a 0.2 m thick stone layer over the upstream face, and a 0.4 m thick peat layer loaded by a double pavement on the downstream face (Fig. 18a).

There is a frozen shield in the body and the foundation of the dam along the total headline.

During the first two years, the soil was frozen by a calcium chloride solution cooled by atmospheric air. The solution was injected into 48 columns from 7 to 15 m deep, which were deepened into the foundation by 2 meters. The columns were arranged in two rows : one row along the core axis, the second one 10.5 meters further downstream. This system proved unsatisfactory due to inadequate cooling of the brine (its temperature exceeding the air temperature by 15 to 20°C) and its penetration into the soils due to pipe corrosion. As the crude salt was dirty, it caused its precipitation at the bottom of the columns and on pipe walls, which reduced the convective heat transfer from the soil, and sometimes created plugs in the pipelines. The expectation that the downstream side slope dam would naturally freeze was not fulfilled, because it was covered with a 4 m thick snow layer, which was a good heat insulator.

After a year of operation leakage appeared on the downstream slope in summer. Two thawed zones of 50 m² and 8 m² in cross section appeared in the river part of the dam (Fig. 18b). The temperature in these zones was up to 0.3°C, and there was transport of particles due to the seepage flow.

To prevent the development of suffusion, the refrigerating system was changed for air cooling in a vacuum mode of operation.

To prevent snow suction together with air, a wooden gallery was constructed with lowers above the columns.

The refrigerating system, operating at air temperature below -10°C during the first years of operation allowed to lower temperature in the dam body to between 0 and -0.5°C. However a reliable operation of the dam was achieved only after

qu'au bout de treize ans, et après l'installation du système frigorifique de M. M. Krylov sur la pente aval, qu'on a réussi à exploiter le barrage de façon fiable (Fig. 18c).

6.1.7. Barrage de la rivière Glukhar

Le barrage de gravier et de sable sur la rivière Glukhar fait 36 m de hauteur par 600 m de long. Le noyau loameux s'enfonce dans le substrat rocheux gelé en permanence.

Les fondations du barrage sont formées de sols à grains grossiers perméables reposant sur une formation de roche fortement fissurée, qui forme un massif pratiquement étanche à moins de 30 m.

Pour la connexion entre le noyau gelé et les matières terreuses des fondations de pergélisol, on a installé dans le talik du lit des colonnes de refroidissement à l'air de la crête du barrage jusqu'à une profondeur de 43 m. Néanmoins, on a préservé une couche de talik de 5 à 10 m d'épaisseur sous cette zone. Pour contrer le risque d'expansion de la zone dégelée, on a installé, pendant l'étape initiale de remplissage du réservoir, un deuxième système de refroidissement dans le talik de la sous-couche, derrière celui qui était déjà en place. Il est constitué de 38 colonnes à circulation forcée de frigorigène liquide. On a déterminé la profondeur requise pour la colonne pendant le forage, d'après la profondeur réelle du talik [5,6].

6.1.8. Barrage de la rivière Sytykan

On a construit un barrage sur la rivière Sytykan pour créer un réservoir de 35×10^6 m³ répondant aux besoins industriels et domestiques [5, 6]. C'est un barrage à bouclier de glace construit sur le pergélisol (Fig. 19a).

Les fondations sont une formation de calcaire à intercouches de dolomites, de calcaires dolomitiques, de marnes et de grès calcareux, à épaisseurs irrégulières comprises entre plusieurs cm et 2 m.

On y trouve diverses matières terreuses dans les talus (loam avec des blocailles et des fragments de roches de type carbonate) et les sols alluviaux (sable fin, gravier et gravier grossier), formant des dépôts de 1,3 à 5 m d'épaisseur sur le substrat rocheux. Les alluvions abritent un grand nombre de lentilles et d'intercouches de glace d'une épaisseur maximale de 4 cm. La teneur en humidité naturelle des dépôts est comprise entre 10 et 74 %, et leur masse volumique, entre 1,6 et 1,9 tonne/m³. Une fois qu'ils sont dégelés, il pourrait y avoir un affaissement de 30 cm par mètre de couche dégelée. Pendant le dégel, il y avait un risque de formation de dolines thermokarstiques pouvant laisser passer de fortes percolations en provenance du réservoir.

Les sols de la rive gauche de la plaine inondable et du talus de l'appui nord, riches en glace, contiennent de grandes quantités de glace enfouies, sous forme de lentilles distinctes d'une épaisseur maximale de 1,8 m. L'épaisseur des loams est comprise entre 1,1 et 2,7 m pour le talus de la rive droite, et entre 2 et 5,8 m pour celui de la rive gauche.

13 years and after the M.M. Krylov refrigerating system was installed on the downstream slope (Fig. 18c).

6.1.7. Dam on Glukhar River

The dam built of gravel and sand on Glukhar river is 36 m high and 600 m long. The loamy core is deepened into the permafrost bedrock.

The dam foundation is composed of permeable coarse - grained soils lying on a strongly fissured rock formation becoming a practically water tight massif below 30 m.

To provide a connection between the frozen core and the permafrost foundation soil, aircooling columns were installed from the dam crest down to 43 m in depth through the bed talik section. Nevertheless, a talik 5-10 m thick was preserved under this zone with a danger that the thawed zone could expand. To prevent it, a second cooling system was installed in the zone of the under-bed talik behind the existing one during the initial stage of reservoir filling. It consisted of 38 columns with forced circulation of a liquid cooling agent. The column depth was determined during drilling based on the actual depth of the talik [5, 6].

6.1.8. Dam on Sytykan River

The dam on Sytykan river was constructed to create a water storage of $35 \times 106 \text{ m}^3$ for industrial and domestic needs [5, 6]. It was built on permafrost with a frozen shield (Fig. 19a).

The foundation is formed of limestone interbedded with dolomites, dolomitic limestones, marls and calcareous sandstones. The thickness of separate interbeds is irregular and vary from several cm to 2 m.

There are talus soils (loam with rubbles and carbonate rock fragments) and alluvial soils (fine sand, gravel, coarse gravel) 1.3 to 5 m thick deposits on the bedrock. Ice lenses and interlayers up to 4 cm thick are often met in the alluvium. The natural moisture content of the alluvial deposits varies from 10 to 74% with a dry density from 1.6 to 1.9 ton/m^3 . When thawed, they could settle 30 cm for each meter of the thawed layer. During thawing, there was a danger for the formation of thermokarst sinkholes that could lead to high seepage losses from the reservoir.

The soils of the left bank floodplane and the slope of the northern abutment are ice - rich containing large amounts of buried ice in the form of separate lenses up to 1.8 m thick. The thickness of the talus loams on the right bank slope ranges from 1.1 to 2.7 m and from 2 to 5.8 m on the left one.

Ces loams sont caractérisés par une teneur en humidité naturelle comprise entre 21 et 94 %, un indice de plasticité compris entre 7 et 10 % et, une fois dégelés, ils ont une consistance liquide et leur tassement n'est pas uniforme ; sous une charge de 0,3 MPa, il est compris entre 18 et 40 %.

Étant donné que les fissures du calcaire semi-rocheux moins altéré contiennent de la glace, on prévoit des déplacements de blocs accompagnés de tassements, causés par le dégel. Ces tassements dépendent du degré d'altération dû au soulèvement du sol par la glace, et ils peuvent atteindre 15 cm pour chaque mètre de couche dégelée. La perméabilité des sols peut varier de 50 à 300 m/jour pendant le dégel.

L'épaisseur du pergélisol est de 300 m, et la profondeur du dégel saisonnier, de 1,5 à 2 m. La température des sols gelés dans les fondations du barrage est comprise entre $-0,9$ et -3°C selon la composition du sol, la distance du lit et le degré d'exposition de la vallée.

Le barrage mesure 600 m de longueur et sa hauteur maximale est de 22 m (Fig. 19a). Les massifs de recharge amont et aval sont faits d'enrochement et de matières semi-rocheuses qui proviennent de l'excavation de l'évacuateur. La zone imperméable est un noyau loameux relié aux fondations par une clé de 2 à 3 m de profondeur qui s'enfonce dans les loams et le substrat rocheux.

Le noyau du barrage est formé de loam silteux dont 23 % des particules sont plus grandes que 2 mm.

Les pentes sont protégées par une couche d'enrochement posée sur des blocailles de diverses dimensions. Il y a une couche isolante de mousse recouverte d'un mélange de sable et de gravier de 0,5 m d'épaisseur sur la crête du barrage.

L'évacuateur de crues et le déversoir en béton armé sont situés sur la rive. Dans la partie amont du canal de l'évacuateur, il y a une galerie qui abrite les colonnes d'un système frigorifique à l'air.

On a installé une conduite avec siphon en acier de 1 m de diamètre, d'un débit de $6\text{ m}^3/\text{s}$, pour tirer du réservoir l'eau destinée aux installations sanitaires. Cette conduite devait aussi accélérer le passage de l'eau dans le déversoir, afin de réduire la probabilité de développement d'une zone de talik sous celui-ci. L'eau du siphon est déversée dans un puits de dissipation du canal de l'évacuateur.

Le système frigorifique à l'air comporte 290 colonnes enfoncées jusqu'à 4 à 7 m sous la clé, à la base du noyau du barrage. Celles-ci pénètrent dans une zone de talik et sont disposées de manière à obtenir un chevauchement complet, afin de congeler cette zone sous le lit. Les colonnes sont regroupées en huit systèmes distincts dont chacun est équipé d'un ventilateur. Le système de répartition d'air est pourvu d'un double collecteur. L'air ambiant froid est aspiré par un collecteur de 600 mm de diamètre relié à des canalisations internes, et il est relâché dans l'atmosphère par les canalisations externes du deuxième collecteur.

Selon la conception, pour congeler le sol et créer un bouclier de glace et de sol gelé, il faut un débit de $20\text{ m}^3/\text{h}$ d'air froid pour chaque mètre de colonne de congélation. Il faut donc $4\,000\text{ m}^3/\text{h}$ d'air froid pour chacun des groupes de colonnes réfrigérantes. Ce système est mis en marche lorsque la température de l'air extérieur chute en bas de -20°C .

The loams are characterized by a natural moisture content of 21 to 94%, a plasticity index of 7 to 10% and being thawed, they have a liquid consistency and show uneven settlements. The relative settlement under a loading of 0.3 MPa varies from 18 to 40%.

The less weathered semi-rock limestone contains ice in cracks, that is why displacements of separate blocks and relevant settlements due to thawing were predicted. The settlements depend on the weathering degree of soil heaving by ice and may reach 15 cm for each meter of the thawed layer. The permeability of the soils may go from 50 to 300 m/day during thawing.

The thickness of the permafrost is 300 m. The depth of seasonal thawing is 1.5 to 2 m. The temperature of the frozen soils in the dam foundation varies from -0.9° to -3°C according to the soil composition, the distance from the riverbed and the exposure of the valley.

The dam is 600 m long and has a maximal height of 22 m (Fig. 19a). The upstream and downstream shells are constructed of rock and semirock excavated from the spillway channel. The impervious zone is a loamy core which connects with foundation by a key 2 to 3 m deep deepened into loams and bedrock.

A silty loam with 23% of particles larger than 2 mm forms the core of the dam.

The slopes are protected by stones laid on rubbles of various dimensions. There is a heat insulating layer of moss covered with a sand-gravel mix 0.5 m thick on the crest of the dam.

The reinforced concrete spillway and chute are located on the bank. In the upstream part of the spillway channel, there is a gallery in which the columns of an air refrigerating system are installed.

A siphon outlet conduit was designed of steel pipes 1 m in diameter with a discharge of $6\text{ m}^3/\text{s}$ to pass sanitary water from the reservoir. One of the purposes of that conduit was a reduction of the time during which water would flow through the spillway, so reducing the probability to develop a talik under it. The water of the siphon is discharged through a stilling well of the spillway channel.

The air refrigerating system incorporates 290 columns deepened by 4 to 7 m below the key at the base of the dam core. They were deepened down to the talik zone to provide complete overlapping and to freeze it under the riverbed. The columns are grouped in eight separate systems each serviced by one fan. The air distribution system has a double collector. The cold atmospheric air is supplied by a collector 600 mm in diameter through internal piping and exit to atmosphere from the second collector through external piping.

The design has shown that to freeze the soil and create an ice-soil shield, $20\text{ m}^3/\text{h}$ of cold air are required for each meter of freezing column. The refrigerating columns are grouped so that $14\,000\text{ m}^3/\text{h}$ of cold air are required for each group. The system is switched on when the outside air temperature is below -20°C .

On a construit le barrage en deux étapes. Après leur construction à un niveau intermédiaire de 12 m, on a gelé le noyau et ses fondations avec un système frigorifique fonctionnant de façon saisonnière. Le réservoir a été rempli par la crue printanière de 1973 et l'excédent a été déversé par-dessus la crête. Le barrage a été exploité dans ce mode pendant deux années et, trois ans après le début des travaux, on avait fini de construire et de congeler le barrage, et la crue était déviée par le canal de l'évacuateur, devenu opérationnel.

Pour surveiller le régime de température du corps et des fondations du barrage, on a mis en place un réseau de trous pourvus de thermomètres dans trois sections. Des trous semblables ont été forés le long du déversoir.

Après vingt ans d'exploitation, on a constaté que des zones de talik s'étaient développées progressivement dans les fondations du barrage et du déversoir. L'épaisseur de la zone dégelée dans les fondations du barrage était passée de 8 à 25 m pendant la période d'observation (Fig. 19b).

Le débit de percolation par cette zone est passé de 150 à 3 200 m³/h de décembre 1994 et la fin de mai 1997.

Les données de thermométrie, de géophysique et de biolocalisation ont permis d'identifier deux principaux chemins d'écoulement de percolation, ainsi que deux aires d'approvisionnement alimentées par le réservoir, près du barrage. On a mesuré les débits de percolation à 30 m de la face aval du barrage et à 100 m de la partie aval du canal de l'évacuateur, et on a mis en évidence une zone dangereuse d'expansion des joints thermiques dans les ouvrages de béton, ainsi qu'une dégradation du renforcement, ce qui permet de mettre en doute l'intégrité du déversoir pour le proche avenir. Des évaluations ont montré que si le débit de percolation dépasse 3 000 m³/h, la capacité de stockage d'eau du réservoir devient insuffisante pour assurer l'approvisionnement en eau prévu.

Après l'examen des études de prospection et des données de conception, et des observations sur place, on a proposé la construction d'un diaphragme en béton et d'un rideau d'injections fait de résines de synthèse, qui doivent s'ajouter aux systèmes de refroidissement à l'air et de pompage construits en 1997 afin de réduire le volume de percolation aux valeurs nominales dans le talik.

À cette fin, on a également envisagé la construction d'un diaphragme fait d'un mélange de terre et de polymères, mis en place dans la zone de percolation intensive par remblayage à sec ou hydraulique.

On a recommandé, pendant le gel du sol des fondations, les limites ci-dessous pour les vitesses de percolation :

- moins de 1,0 m/jour dans la zone dégelée du système frigorifique à l'air en place ;
- entre 1,0 et 5,0 m/jour pour la zone du système frigorifique à la vapeur ;
- pour les vitesses de percolation supérieures, on pourrait congeler les zones de talik à l'aide de méthodes de réfrigération inhabituelles (refroidisseurs à tourbillon, machines à gaz cryogénique, compresseurs-extenseurs, etc.) [6].

The dam was constructed in two stages. After its construction to the intermediate level of 12 m, the core and its foundation were frozen with a seasonally acting refrigerating system. The reservoir was filled with the spring flood of 1973 and the additional water was discharged over the crest. The dam was operated in that mode for two years. By the end of the third construction year, the dam was totally built and frozen, and the flood was passed through the operational spillway channel.

To monitor the temperature regime of the body and foundation of the dam, a system of holes equipped with thermometers was installed in three sections. Similar boreholes were located along the spillway channel.

It was found after 20 years of operation that talik zones had developed progressively in the foundation of the dam and the spillway channel. The thickness of the thawed zone in the dam foundation has increased from 8 to 25 m during the observation period (Fig. 19b).

The seepage flow through that zone has increased from 150 m³/h in December 1994 to 3200 m³/h by the end of May 1997.

According to thermometrical, geophysical and biolocation data, two main seepage flow paths were identified as well as two supply areas from the reservoir nearby the dam. The seepage flow discharges were recorded at a distance of 30 m from the downstream face of the dam and 100 m from the downstream part of the spillway canal. A dangerous expansion of the thermal joints in the concrete structures was observed as well as a breakdown of the reinforcement, causing caution about the integrity of the chute in the near future. Evaluations have shown that if the seepage is over 3000 m³/h, the water storage in the reservoir is not sufficient to ensure the water supply required.

Based on prospecting studies, design data and in situ observations, it was suggested to construct a concrete diaphragm and a grout curtain with synthetic resins, in addition to the system of air cooling and pumping built in 1997 to reduce the seepage rate in the talik down to the design rate.

To reduce the seepage volume it was also considered to construct an earth to earth-polymer diaphragm by dry or hydraulic filling in the zone of intensive seepage.

Foundation soil freezing was recommended to be done considering seepage velocity as follows:

- less than 1.0 m/day in the thawed zone with the existing air refrigerating system;
- between 1.0 and 5.0 m/day with a steam refrigerating system;
- for higher velocity of seepage, the talik zones could be frozen with unconventional temperature methods (vortex coolers, cryogenic gas machines, compressor expander engines, etc.) [6].

6.2. BARRAGES EN MATÉRIAUX MEUBLES DE TYPE DÉGELÉ

6.2.1. Barrage de Kadyktchanskaïa

On a construit le barrage de Kadyktchanskaïa en 1968 sur le ruisseau du même nom, qui se jette dans le cours supérieur de la rivière Kolyma. Ce barrage mesure 574 m de longueur par 8 m de hauteur [5, 22].

Les fondations du barrage sont constituées d'une couche de gravier alluvionnaire avec des galets de 3,5 à 5,0 m d'épaisseur, d'une perméabilité comprise entre 40 et 4 000 m/jour. Sous cette couche, il y a une couche de 2,5 à 7,0 m de loams et de loams sableux avec des cailloux, d'une perméabilité d'environ 0,02 m/jour. Le substrat rocheux est formé par une couche d'argile litée fissurée, coupée par une couche d'andésite dans la partie centrale du site (Fig. 20a).

Il y a une zone de talik de 7 m de profondeur sous le lit du cours d'eau, qui gèle jusqu'à 4 m en hiver.

La rive droite est formée de sols diluviens de galets et de blocailles gelés, avec des matériaux de remplissage de type sable et loam sableux, soulevés par la glace. Sur la rive gauche, on observe la plus forte teneur en glace dans la partie supérieure du sol chargé de galets.

On a construit le barrage sur une fondation gelée, et les études de conception ont prévu un certain dégel des fondations au cours de la phase de l'exploitation.

Le massif de recharge amont du barrage est formé de sable et de gravier et celui en aval, de gravier à galets. La tranchée parafouille du noyau, en loams à blocailles, est creusée jusqu'à 0,5 m dans les loams des fondations.

Au cours de l'étape de la conception, on a envisagé une excavation de 2,5 m de profondeur dans le substrat rocheux sur l'appui en rive droite, mais cette idée a été abandonnée.

Peu après le remplissage du réservoir, on a observé une percolation à travers les fondations et le corps du barrage. On a foré des trous et des puits d'essai pour trouver les sources de percolation. Les études ont montré que les caractéristiques des sols ne correspondaient pas à celles prévues lors de la conception. La perméabilité des sols tout le long du barrage était comprise entre 250 et 1 000 m/jour. On a creusé la tranchée parafouille de la rive droite avec d'importants changements par rapport aux plans, car sa profondeur et sa longueur ne correspondaient pas aux valeurs de la solution retenue. Une voie de percolation concentrée d'un débit de 360 m³/h s'est formée dans le corps du barrage à cause du non-respect des critères de filtre.

Par ailleurs, les études ont montré qu'il y avait une lentille de glace d'une épaisseur maximale d'un mètre dans l'appui gauche, sous la tranchée parafouille creusée, mais à l'intérieur des limites d'implantation. Elles ont aussi montré qu'il y avait des lentilles de glace de 20 à 30 m d'épaisseur dans l'appui droit, qui n'avaient pas été mises en évidence au cours des études préliminaires (Fig. 20b).

Au cours de l'hiver 1967-68, on a observé un débit de percolation de 1 200 m³/jour pendant tout l'hiver. Une Injection de coulis a permis de réduire la percolation dans certaines sections du corps et des fondations du barrage, mais on n'a pas obtenu le succès escompté.

6.2. EMBANKMENT DAMS OF THE THAWED TYPE

6.2.1. Kadykchanskaya Dam

The Kadykchanskaya Dam was built in 1968 on a brook with the same name on the upper Kolyma River. The dam is 574 m long and 8 m high [5, 22].

The foundation of the dam consists of a layer of alluvial gravel with pebbles 3.5-5.0 m thick, with a permeability between 40 and 4000 m/day. Below that layer, there are 2.5 to 7.0 m of loams and sandy loams with stones having a permeability around 0.02 m/day. The bedrock is a fissured clay shale intersected by andesite in the central part of the site (Fig. 20a).

There is a 7 m deep talik under the riverbed, which is frozen to 4 m in winter.

The right bank is formed of deluvial icy pebble-rubble soils with sandy and sandy loam filler heaved by ice. The soil of the left bank consists of pebble soils which have their highest ice content in the upper part.

The dam was built on a frozen foundation, the design taking into account some foundation thawing operation.

The upstream shell of the dam is constructed of sand and gravel and the downstream shell of gravel with pebbles. The key trench of the core constructed with rubble loams was deepened into the foundation loams for 0.5 m.

The excavation into the bedrock for 2.5 m on the right bank abutment was considered at the design phase but not fulfilled.

Soon after the reservoir filling, water seepage was observed through the foundation and the dam body. Boreholes were drilled and test pit excavations were carried out for finding the seepage sources. The studies have shown that the actual characteristics of the soils did not correspond to the ones used in design. The permeability of the soils all along the dam varies from 250 to 1000 m/day. The right bank key trench was executed with serious deviations from the designed provisions: its depth and length did not correspond to the design solution. A concentrated seepage path with a discharge of 360 m³/h developed in the dam body due to violations in filtration rules.

Besides, the studies have shown that there is an ice lens up to 1 m thick in the left abutment below the depth of the actual key trench, but within the design layout. The studies have also shown that there is a 20-30 m thick ice lens in the right abutment, which was not discovered during investigations (Fig. 20b).

In the winter 1967-1968, a seepage flow of 1200 m³/day was observed the whole winter. Grouting was carried out to reduce the seepage in some sections of the dam body and foundation, but failed to bring positive results.

Au cours de l'été 1970, il s'est formé une brèche dans le barrage, près de l'appui en rive droite, qui a entraîné un colmatage du filtre par des matériaux terreux. Le niveau du réservoir a chuté de 4 m en 4,5 heures et ce dernier s'est complètement vidé. Une zone de passage des eaux de percolation d'une section transversale pouvant atteindre 5 m, formée dans les sols gelés au point de rupture du barrage, s'est effondrée au bout de cinq jours. Des fissures pouvant atteindre 1,2 m de largeur et 2,5 m de profondeur sont apparues dans le corps du barrage. Des lentilles de glace ont fondu et se sont ouvertes dans les parois du canal de fermeture en amont et en aval.

La reconstruction de la partie détruite du barrage a été terminée à l'automne 1970 [5, 6, 22].

6.2.2. Barrage de Kureiskaïa

Cet aménagement hydraulique comporte un barrage en matériaux meubles formé de quatre parties distinctes, un évacuateur de crues en béton et une centrale (Fig. 12a). Il a été construit en 1991, à 100 km de la bouche de la rivière Kurejka, au-delà du cercle polaire. Le climat de cette région est fortement continental, avec des températures moyennes annuelles de -9°C et des variations de la température de l'air pouvant atteindre 90°C au cours d'une année [6, 8, 14, 25, 29, 30, 31, 34].

Les barrages en matériaux meubles ont été construits dans une région d'îlots de pergélisol. Le barrage principal, situé dans le lit d'un cours d'eau, a une crête de 1 576 m de longueur et il repose sur des fondations rocheuses (dolérite) et sur des dépôts glaciaires formés de loams, de loams sableux, de sables, de graviers mélangés à des galets et à des gros blocs, répartis au hasard. La perméabilité de ces sols du quaternaire est comprise entre 0,5 et 30 m/jour (Fig. 12b).

Pour la partie du barrage située sur la dolérite, on a construit un ouvrage en terre et en enrochement pourvu d'un noyau de sable loameux d'une hauteur maximale de 81,5 m. Dans la zone des dépôts glaciaires (jusqu'à 30 m de hauteur), le noyau se transforme en une couche de 3 à 4 m d'épaisseur (Fig. 12b). La crête du barrage est à 100,1 m et le sommet du noyau, à 95,5 m. Le niveau normal de l'eau est à 95,0 m et son niveau maximal, à 97,3 m.

Le 26 juillet 1992, il y a eu une situation d'urgence dans la partie du barrage bâtie dans le lit : une éruption d'eaux de percolation, d'un débit pouvant atteindre 1 740 l/s, s'est développée à peu près au centre du barrage, accompagnée d'un écoulement de fines particules pouvant atteindre 0,85 g/l. La crête du barrage s'est affaissée de 1 m au plus sur une longueur d'environ 60 m, avec une inclinaison surtout vers l'amont. Plusieurs fractures longitudinales d'une ouverture maximale de 0,1 m sont apparues sur la crête. Un cône de 10 m de diamètre et de 1,85 m de profondeur s'est formé sur la pente aval, à une distance de 8 à 10 m de la crête.

Les mesures correctives suivantes ont été prises immédiatement : on a abaissé le niveau du réservoir ; on a déversé du gravier sableux et silteux sur la pente amont du barrage, dans la zone du cône ; on a renforcé la pente aval et on a installé un réseau de drainage au niveau de la semelle. Après une chute de 5 m du niveau du réservoir, le débit du percolation est tombé dans la plage de 100 à 240 l/s. On a construit un rideau d'argile-ciment à trois rangs sur une longueur de 33,5 m, jusqu'à

In the summer of 1970, a dam blowout near the right bank abutment occurred resulting from a squeezing of soils throughout the filter. The level of the reservoir dropped 4 m in 4.5 hours. The reservoir was completely emptied. A seepage passage up to 5 m in cross section appeared in the dam failure zone in frozen soils which persisted for five days before breaking down. Cracks appeared in the dam body up to 1.2 m wide and 2.5 m deep. An ice lens melted and opened in the sides of the closure channel upstream and downstream.

By the autumn of 1970, the destroyed part of the dam was reconstructed [5, 6, 22].

6.2.2. Kureiskaya Dam

The hydraulic development incorporates an embankment dam in four distinct parts, a concrete spillway and a power plant (Fig. 12a). It was built in 1991, 100 km from the mouth of Kurejka river beyond the Polar Circle. The climate in the region is extremely continental, the yearly average temperature is -9°C and the air temperature variation reaches 90°C within a year [6, 8, 14, 25, 29, 30, 31, 34].

The embankment dams are constructed in a region where permafrost is found by local patches. The main dam located in the riverbed and having a 1576 m long crest rests on rock foundation (dolerite) and on glacial deposits consisting of randomly distributed loams, sandy loams, sands, gravels with pebbles and boulders. The permeability of those Quaternary soils varies from 0.5 to 30 m/day (Fig. 12b).

The design of the dam part located on dolerite is an earth and rockfill dam with a loamy sand core 81.5 m at its maximal height. In the zone of the glacial deposits (up to 30 m high), the core is transformed into an 3-4 m thick blanket (Fig. 12b). The level of the dam crest is 100.1 m and the level of the core top is 95.5 m. The normal water level is 95.0 m and the maximum water level is 97.3 m.

An emergency situation occurred on the riverbed dam July 26, 1992: a seepage blowout developed approximately in the center with up to 1740 l/s discharge accompanied by a removal of fine particles up to 0.85 g/l. The crest of the dam settled a maximum of 1 m for a length of about 60 m and generally inclined towards the upstream side. Several longitudinal cracks opened up to 0.1 m appeared in the crest. On the downstream slope 8-10 m from the crest appeared a cone 10 m in diameter and 1.85 m deep.

Reservoir drawdown was started immediately to attempt remedial measures; the upstream slope of the dam in the cone area was filled with a silty sandy gravel; the downstream slope was strengthened and drainage was installed at its footing. When the level of the reservoir was lowered by 5 m, the seepage discharge decreased between 100 and 240 l/s. A three row clay-cement curtain was constructed down to 30 m in the blowout zone from the dam crest for a length of 33.5 m. The

30 m dans la zone de la brèche, sur la crête du barrage. La distance entre les rangs était de 2 m, tout comme l'espacement entre les trous. Ainsi, au printemps 1993, le débit du percolation avait été ramené à des valeurs voisines de celles d'avant la brèche (de 20 à 40 l/s). Après l'inondation de 1993, le niveau du réservoir était remonté à 94,5 m et la centrale avait retrouvé son régime normal d'exploitation.

Pour établir les causes de cette rupture et prendre de bonnes décisions pour les réparations, on a effectué une étude globale de l'ensemble du barrage faisant appel à des trous de forage et à une analyse des données de surveillance géotechnique sur l'état de contrainte et de déformation du barrage, les conditions de fissuration et la résistance à la percolation.

Selon les données obtenues pendant le forage pour la mise en place du rideau d'argile-ciment (de 2 417 mètres de long), on a trouvé, dans la partie endommagée du barrage, de nombreuses zones de sol ameubli, de lentilles de sols à grains grossiers, de sols gelés et de bandes de sols salins. On a utilisé un volume total de 783 m³ de mélange ciment-bentonite, soit 1 108 tonnes en poids sec.

D'autres études ont montré qu'entre les stations 5+00 et 7+80 et entre les stations 8+50 à 13+80, le noyau fissuré était dans un état critique. Il faut prendre des mesures supplémentaires d'urgence dans ces sections pour augmenter la résistance à la percolation, et les plus urgentes devaient viser en priorité la partie comprise entre les stations 6+10 à 7+60.

Comme mesure anti-percolation, on a recommandé la construction d'un mur (diaphragme) coulé sur place selon la méthode des pieux sécants de 1,2 m de diamètre. On a construit ce mur dans le noyau à partir de la crête, sur la hauteur totale du barrage, jusque dans les loams sous-jacents du barrage. La matière choisie pour le mur était un mélange plastique d'argile-béton d'une résistance à la compression de 1 à 2 MPa, avec un module de déformation de 1 000 à 2 000 MPa [30].

6.2.3. Barrage de la rivière Pravaya Magdagacha

On a construit un barrage à diaphragme en béton sur la rivière Pravaya Magdagacha en 1932, afin de créer un réservoir d'eau potable et de consommation domestique (Fig. 21). Ce barrage de loams et de blocailles fait 350 m de longueur par 7,3 m de hauteur. Sa tête d'eau est de 4 m. Une fois qu'il a été rempli, les porphyrites fissurées et glacées des fondations du barrage ont commencé à fondre. La percolation a intensifié le dégel, ce qui a causé des tassements irréguliers dans les fondations, qui ont provoqué la rupture du diaphragme en béton et du barrage [5,6].

distance between the rows was 2 m as well as the space between the holes. The seepage discharge was reduced to values close to those before failure (20-40 l/s) by the spring of 1993. After the flood in 1993, the reservoir level was risen to 94.5 m and the normal plant operation was restored.

To find out the reasons for the failure and to make decisions on repair measures, comprehensive investigations of the whole dam were carried out by deep boreholes, by the analysis of geotechnical monitoring data stress-strain state of the dam, the fissuring conditions and the seepage resistance.

According to the data obtained during drilling of the clay-cement curtain (2417 linear meter), multiple zones of soil loosening, lenses of coarse-grained soils, frozen soils and bands of saline soils were found in the damaged section of the dam. The total volume of the cement-bentonite mixture used was 783 m³ and the dry material weight (cement and bentonite) was 1108 tons.

Further studies have shown that the core from station 5+00 to station 7+80 and from station 8+50 to station 13+80 was in a critical state with respect to cracking. These sections require urgent additional anti-seepage measures to improve the seepage resistance, the most urgent part being from station 6+10 to station 7+60.

A cast-in-situ wall (diaphragm) constructed with the method of secant piles 1.2 m in diameter was recommended as an effective anti-seepage measure. The wall has been constructed in the core from the crest, through the total height of the dam and deepened into the loams underlying the dam. The material chosen for the wall is a plastic clay-concrete with a compressive strength of 1-2 MPa and a deformation modulus of 1000-2000 MPa [30].

6.2.3. Dam on Pravaya Magdagacha River

A dam with a concrete diaphragm was constructed on Pravaya Magdagacha River in 1932 to make a reservoir for potable and domestic waters (Fig. 21). The dam was constructed using loams with rubbles. It is 350 m long and 7.3 m high. The head is 4 m. When the reservoir was filled, frozen icy fissured porphyrites in the dam foundation started to thaw. Seepage intensified thawing and led to irregular settlements of the foundation. Because of that, the concrete diaphragm broke and the dam failed [5, 6].

7. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA CONSTRUCTION ET DE L'EXPLOITATION DES BARRAGES

La zone cryolithique naturelle est très vulnérable aux changements environnementaux. Tout type d'activité industrielle, surtout s'il n'a pas fait l'objet d'un examen suffisant, peut perturber l'équilibre environnemental et avoir des effets négatifs. On doit choisir une approche très prudente pour la conception et la construction des ouvrages hydrauliques.

L'impact le plus important sur l'environnement est celui des réservoirs. Au cours de la première partie de la saison chaude, ils refroidissent leur voisinage et au cours de la seconde, ils réchauffent l'environnement, et on observe une diminution des écarts des températures diurnes. Par exemple, la température de l'eau du réservoir de la CH de Viluiskaïa-I est montée à 24°C dans sa partie supérieure et à environ 5°C à une profondeur de 50 m, pour descendre à 3,2°C vers la fin de l'hiver, avec une température d'environ 1,5°C à une profondeur de 5 m. Une température relativement élevée dans le réservoir contribue à accélérer la débâcle.

Dans les régions montagneuses, on a observé de plus fortes précipitations sur les pentes du réservoir. La vitesse du vent augmente habituellement par un facteur de 1,3 à 1,5 après le remplissage du réservoir.

L'un des problèmes environnementaux est celui de masses de tourbe flottante. Pour empêcher ce phénomène, de nombreux réservoirs du Nord étaient protégés par des estacades flottantes installées près de la prise d'eau et des ouvrages d'évacuation. Toutefois, dans les faits, on n'a observé que peu de cas de masses de tourbe flottante. Il semble évident que les prévisions de tourbe flottante qui sont valables pour les réservoirs du Sud ne peuvent être appliquées à la zone cryolithique [12, 15, 21].

Il y a d'autres cas d'impact négatif des réservoirs. Par exemple, leur régime de vagues, caractérisé par des vagues pouvant atteindre 3 m de hauteur, contribue à transformer activement leurs rivages, et plus particulièrement s'ils sont bordés de sols riches en glace.

Le régime des glaces sur les grands réservoirs cause des problèmes qui nécessitent des études spéciales, étant donné que la majorité des ouvrages hydrauliques qu'on prévoit construire dans la zone cryolithique sont conçus pour des cours d'eau s'écoulant du sud vers le nord. Sur ces derniers, la débâcle commence dans le cours supérieur, alors que le cours inférieur est encore recouvert d'épaisses glaces.

Des zones d'eau libre pouvant atteindre 250 km de longueur, formées dans le bief aval, ont des effets néfastes sur l'environnement, notamment pour la santé humaine. Une plus grande teneur en humidité de l'air cause un nombre croissant de cas de catarrhes. De plus, le grand nombre de jours de brouillard détériore les conditions générales des transports, notamment pour les déplacements par aéronefs.

7. ENVIRONMENTAL IMPACTS OF DAM CONSTRUCTION AND OPERATION

The cryolithozone nature is very vulnerable to environmental changes. Any type of industrial activity especially if it is not sufficiently studied may violate the ecological balance and lead to negative consequences. A specially cautious approach shall be chosen for the design and construction of hydraulic structures.

The most important environmental impact is produced by reservoirs. In the first part of the warm season, they are cooling the surroundings and in the second part of the year they are warming the environment. A smoothing of diurnal temperature is observed in such cases. For example, the water temperature in the upper portion of the reservoir of Viluiskaya HPP-I rises to 24°C and is about 5°C at the depth of 50 m, decreasing to 3.2°C by the end of winter, while the temperature at a depth of 5 m is about 1.5°C. A relatively high temperature in the reservoir contributes to acceleration of the ice break.

In the mountainous areas, enhanced precipitation is observed on the reservoir slopes. The wind velocity generally increases by 1.3 to 1.5 times after reservoir filling.

One of the problems affecting the environment is floating up of peat. Due to predicted peat floating up, numerous northern reservoirs were protected by floating booms installed near the water intake and spilling structures. But in fact, no widespread occurrence of peat masses floating was observed. Evidently, the predictions of peat floating developed for reservoirs located elsewhere cannot be applied for the cryolithozone [12, 15, 21].

Another example of the negative impact of the reservoirs is linked with their wave regime, which is characterized by waves up to 3 m high, contributing to active transformations of reservoir banks, especially if they are formed of ice-rich soils.

The ice regime on large reservoirs is a problem requiring special studies, as the majority of hydraulic structures planned for construction in the cryolithic zone are designed on rivers flowing from south to north. Ice break on these rivers starts on the upper portion while the downstream part is still covered with heavy ice.

Open water patches up to 250 km long are formed in the downstream reach which negatively affect environment, including conditions of human life. The enhanced air moisture content is responsible for increasing the number of cases of catarrahl disease. The great number of foggy days deteriorates the transport operation, especially by aircraft.

De plus, on note souvent des embâcles dans les zones d'élargissement du réservoir, à cause d'une réduction de la section active du lit du cours d'eau due à l'accumulation d'une mince couche de glace friable. On observe aussi des embâcles dans la zone en aval des turbines, où ils peuvent obstruer les eaux de fuite, ce qui a pour effet de réduire les charges de pression des centrales et ainsi, leur capacité.

On doit examiner l'effet de tous ces facteurs négatifs au cours de la conception des ouvrages hydroélectriques.

Les communautés doivent être déplacées dans la partie amont du cours d'eau, et les terrains d'atterrissage et leurs installations doivent être situées dans des lieux moins vulnérables à l'impact des zones d'eau libre au milieu des glaces.

Les changements climatiques dans les secteurs voisins du réservoir et l'impact des vagues sur les rivages favorisent l'apparition et le développement de processus cryogéodynamiques.

L'impact des vagues sur les rivages des réservoirs remplis d'eau relativement chaude contribue à un processus d'abrasion thermique particulièrement actif dans les sols saturés de glace.

L'eau relativement chaude des réservoirs change les régimes de température des rivages et du fond et cause le dégel du pergélisol à une vitesse de 4 à 5 m/an, ce qui renforce grandement l'activité thermokarstique. Le réservoir de la CH d'Ust-Khantaiskaïa n'a pu être rempli au niveau nominal prévu à cause d'un processus thermokarstique agissant sur le fond et sur les rivages faits de matériaux terreux à forte teneur en glace, accompagné d'une augmentation de la profondeur du réservoir et de l'élargissement de son bassin [12, 21].

Le dégel du sol peut entraîner des changements dans les conditions hydrogéologiques des zones voisines du réservoir, accompagnés d'une hausse de la nappe phréatique, d'une augmentation de la capacité de rétention d'eau des aquifères existants et de l'inondation de certains secteurs adjacents au réservoir.

Ce dernier phénomène n'est pas aussi répandu dans la zone cryolithique qu'ailleurs, mais, dans des conditions techniques et géologiques favorables, il est également prévisible.

À cause de l'augmentation de la capacité de rétention d'eau des sols dans les zones adjacentes aux réservoirs, on peut aussi observer une amélioration des conditions d'irrigation des zones asséchées et des approvisionnements en eau des communautés riveraines des réservoirs.

La résistance de sols gelés se dégrade avec le dégel, car leur déformabilité et leur perméabilité augmentent, alors que leur résistance diminue. En plus de déformations possibles dans les ouvrages en place, ces conditions peuvent causer des cas de solifluxion et des glissements de terrain, et la stabilité des cours d'eau à lit rocheux et des pentes naturelles peut être réduite [12, 16].

Toutefois, la construction de réservoirs n'a pas toujours des effets négatifs.

Par exemple, selon des études, la construction de la CH de Kolymaskaïa a eu un certain nombre d'effets positifs sur l'environnement. Une fois remplis, les réservoirs situés sur la route d'oiseaux migrateurs seront adoptés par ceux-ci comme aire de

Ice jams can also often occur in the zones of reservoir enlargement, due to a reduction of the river channel active section by the accumulation of thin friable ice. Ice jams are also observed downstream of power plants where they can back up the tailwaters and reduce the power station heads and therefore their capacity.

All these negative factors should be considered when designing hydropower structures.

Communities shall be relocated to the upstream portion of the river, air strips with their facilities shall be located at places less affected by the impact of non-freezing ice openings.

The changes in climate in the areas close to reservoirs and the wave impact on the banks initiate the occurrence and development of the cryogeodynamic processes.

The wave impact on the banks of reservoirs filled with relatively warm water leads to a thermal-abrasion which is particularly active in ice saturated soils.

The warm water of the reservoirs changes temperature regimes of the banks and bottom and leads to permafrost thawing with a 4-5 m annual rate. Thermokarst action is strongly reactivated. The reservoir of Ust-Khantaiskaya HPP could not be filled to the designed level due to thermokarst processes acting on the bottom and the banks made of soils with a high ice content accompanied by an increase in the depth and an expansion of the reservoir basin [12, 21].

Soil thawing may lead to changes in hydrogeological conditions of the areas close to the reservoir accompanied by a rise of the ground water table, an increase of the water-bearing capacity in existing aquifers and the flooding of some areas adjacent to the reservoir.

The latter phenomenon is not as widespread in the cryolithozone than elsewhere, but with corresponding engineering-geological conditions, its occurrence could be equally expected.

Because of the rise in the water-bearing capacity of the soils in areas adjacent to the reservoirs, the irrigation of unwatered zones as well as the water supply of communities located along the reservoir may be favorably influenced.

The strength parameters of frozen soils degenerate with thawing : deformability and permeability increase, strength reduces. Besides the possible deformation of existing structures, this may cause solifluction and landsliding to be reactivated and the stability of the rocky streams and natural slopes may be reduced [12, 16].

At the same time, the creation of reservoirs does not always lead to negative consequences.

For instance, according to investigations, the construction of Kolymaskaya HPP has resulted in a number of positive environmental impacts. Once filled, the reservoir located in route of bird migration will become the nesting site for the

nidification. L'équilibrage de l'écoulement annuel de la rivière Kolyma a une influence favorable sur les conditions sanitaires de la zone de la rivière en aval du réservoir. À cause des caractéristiques particulières de la structure géologique des rivages, on s'attend à ce que l'abrasion thermique ne croisse pas tellement, étant donné que la déformation du secteur riverain ne touchera que la zone située à moins de 250-400 m du bord de l'eau.

L'analyse des conditions du réservoir pendant l'exploitation de centrales hydroélectriques montre que l'inondation de grandes superficies de forêts non commerciales touche surtout les ressources piscicoles. Toutefois, après une période de 5 à 6 ans, les conséquences de ces impacts deviennent négligeables et on note une augmentation de la masse des stocks de poissons comme les gardons, les perches, les grémilles et les brochets dans les principaux réservoirs [15].

birds. The balancing of the yearly runoff of Kolyma river favourably influences sanitary conditions of the river downstream of the reservoir. Due to characteristic features of the banks geological structure, it is expected that thermal abrasion will not gain wide development since the deformation of the coastal area will influence only a zone within 250-400 m from the bank.

The analysis of reservoir conditions during operation of hydropower plants shows that flooding large areas of non-commercial forests primarily affects the fish production. But after a 5-6 years period, the consequences of such impacts become negligible and the stocks of fishes as roach, perch, ruff and pike gain mass development in major reservoirs [15].

8. REFERENCES

- (1) An V. Design of refrigerating devices in spillway structures of hydraulic power plants in Western Yakutiya. Transactions of the Conference on hydraulic engineering « Hydraulic engineering construction in the northern climatic zone », L. 1980, p. 32-35.
- (2) BATENCHOUK, E.N., BIYANOV G.F., TOROPOV L.N., MYZNIKOV Yu.N. Winter placing of cohesion soils in the Extreme North, M. Energiya, 1968, 112 p.
- (3) BELAN V.I. Bank connections of embankment dams in permafrost conditions. M. Energoatomizdat, 1991, 125 p.
- (4) BIYANOV G.F. Water discharge during the construction of Viluiskaya HPP and damming the Viluy river. Hydrotechnical Construction, 1966, No 2, p. 58.
- (5) BIYANOV G.F. Dams on permafrost. M. Energoatomizdat, 1983, 176 p.
- (6) BIYANOV G.F., KOGODOVSKIY O.A., MAKAROV V.I. Earth and rockfill dams on permafrost. Yakutsk Institute of Permafrost, Academy of Sciences of the USSR, 1989.
- (7) BIYANOV G.F., KUPERMAN V.L., KUDOYAROV L.I., TOROPOV L.N. Improvement of technology of embankment dam construction in severe climatic conditions. Power Engineering Construction, 1982, No 11, p. 44-48.
- (8) BOGOSLOVSKIY P.A., YERAKHTIN B.M., FRISHTER Yu.I. Optimal design and layout selection for hydropower plants in the Extreme North. Power Engineering Construction, 1986, No 5, p. 34-37.
- (9) DEMIDOV A.N., SMIRNOV E.A. The condition of the dam of Viluiskaya HPP from in-situ observation data. Transactions of Hydroproject, 1982, No 84, p. 146-156.
- (10) FRISHTER Yu.I., SEROV A.A., YOHELSON A.Ya., KOGODOVSKIY O.A. Temporary dam of Kolymskaya HPP. Power Engineering Construction, 1983, No 1, p. 13-16.
- (11) KAGAN A.A., KRIVONOGOVA N.F. Perennially frozen rock foundations for structures. L. Stroyizdat, 1978, 208 p.
- (12) KAGAN A.A., KRIVONOGOVA N.F. Engineering-geological conditions for construction and operation of hydraulic engineering structures on perennially frozen rock in « Problems of engineering permafrostology in hydraulic engineering construction », M. Nauka, 1986, p. 33-44.

- (13) KOGODOVSKIY O.A. Constructional settlements of upstream shell of embankment dam of Viluiskaya HPP. *Hydrotechnical construction*, 1972, No 4, p. 32-34.
- (14) KOGODOVSKIY O.A. Case history of construction of earth-rockfill dams in the northern climatic zone. « Problems of engineering permafrostology in hydraulic engineering construction », M. Nauka, 1986.
- (15) KOGODOVSKIY O.A., FRISHTER Yu.I. Hydraulic power engineering in the Extreme North-East, M. Energoatomizdat, 1987, 304p.
- (16) KRIVONOGOVA N.F. Problems of hydraulic engineering construction in Central Siberia in « Geocryology of the USSR. Central Siberia », 1989, p. 214-227.
- (17) KRIVONOGOVA N.F. Monitoring of natural-hydraulic engineering systems in cryolithozone. Transactions of the 1st Conference of geocryology of Russia. Book 4. M., 1996, p. 88-92. « Problems of engineering permafrost science in hydrotechnical construction », M. Nauka, 1986.
- (18) KRIVONOGOVA N.F., TOLOKNO N.V., TZOKURENKO K.M. Permafrost dynamics during the construction of a dam in the Extreme North. Summary of the VII Conference of Hydroproject, 1981, p. 57-59.
- (19) KRIVONOGOVA N.F., ZISKOVICH V.E., KUZNETSOV A.L. Importance of permafrost conditions in hydraulic engineering design. Transactions of III International permafrost conference. Novosibirsk, Nauka, 1978, p. 32-49.
- (20) KRONIK Ya.A., KADKINA E.L., SKOBLIN G.A. Temperature and seepage regime of run-of-the-river dam of Ust-Khantaiskaya HPP during the first operation years. *Power Engineering Construction*, 1980, No 6, p. 62-65.
- (21) KRONIK Ya.A., ONIKIENKO T.S. Effect of thermal abrasion on the banks and bed of Khantaiskoye reservoir on the increase of its volume in « Hydraulic engineering construction in the northern construction-climatic zone ». Transactions of conferences on hydraulic engineering, VNIIG, L. Energoatomizdat, 1980, p. 14-17.
- (22) KUDOYAROV L.I., PAVCHICH M.P., RADCHENKO V.G. et al. Embankment dams in the Extreme North and permafrost zones. L. Energoatomizdat, 1973, 132 p.
- (23) KUPERMAN V.L., MYZNIKOV Yu.N., PLOTNIKOV V.M. Ust-Khantaiskiye dams. M. Energiya, 1977, 152 p.
- (24) KUPERMAN V.L., MYZNIKOV Yu.N. Concerning the conditions of the core of the run-of-the-river dam of Ust-Khantaiskaya HPP. *Power Engineering Construction*, 1980, No 6, p. 61-65.

- (25) KUPERMAN V.L., MYZNIKOV Yu.N., TOROPOV L.N. Hydraulic power engineering in the Extreme North, M. Energoatomizdat, 1987.
- (26) Manual on the consideration of conditions for ice passage during the design, construction and operation of hydraulic power schemes. BCH 10-76 Minenergo SSSR. M., 1976, 70 p.
- (27) Manual for the design of hydraulic engineering structures in permafrost areas. BCH 30-83 Minenergo SSSR. L. Energiya, 1983, 130 p.
- (28) MUKHETDINOV N.A., FAINITSKIY B.B. Thermal regime of filtering impervious elements of embankment dams in « Engineering permafrostology in hydraulic engineering construction ». Transactions of the Conferences on hydraulic engineering. VNIIG, L. Energoatomizdat, 1984, p. 38-42.
- (29) MYZNIKOV Yu.N. Standards for the design and construction of embankment dams in the northern construction-climatic zone. Power Engineering Construction, 1981, No 9, p. 39-42.
- (30) MYZNIKOV Yu.N. Considerations of so-called heaving resistant heads of the crests of embankment dams, constructed in the Extreme North. Hydrotechnical Construction, 1998, No 3.
- (31) MYZNIKOV Yu.N. Design and technological safety decisions for embankment dams in the Extreme North. Hydrotechnical Construction, 1993, No 12, p. 33-38.
- (32) MYZNIKOV Yu.N., POLDOMASOV B.E. Preparation of permafrost foundation of earth and rockfill dam, cut by bed talik. Power Engineering Construction, 1981, No 4, p. 47-53.
- (33) OLOVIN B.A., MEDVEDEV B.A. Temperature field dynamics of a dam of Viluisкая HPP. Novosibirsk, Nauka, 1980, 48 p.
- (34) PEHTIN V.A., SEROV A.A., SUSLOPAROV V.A. Design of crests of earth and rockfill dams in northern climatic zone. Hydrotechnical Construction, 1998, No 3.
- (35) PRAVDIVETS Yu.P. Water overflow over earth dams. Power Engineering Construction, 1980, No 7, p. 41-42.
- (36) Recommendations for the design and construction of embankment dams for industrial and utility water supply in the conditions of Extreme North and permafrost, VNIIVODGEO, M. Stroyizdat, 1976, 112 p.
- (37) SEMICHEVA N.M., KRIVONOGOVA N.F. VILUISKAYA dam on the Vilui river in « Geology and dams », 1987, v. XI, p. 17-196.

- (38) SMIRNOV E.A. Effect of natural ice-formation on the temperature regime of earth and rockfill dam. « In Hydraulic engineering construction in permafrost and severe climate areas ». Transactions of the conferences on hydraulic engineering», VNIIG Energiya L., 1979, p. 103-107.
- (39) SNIP 2.06.05-84* Embankment dams. Gosstroy SSSR. M.,1991, 56 p.
- (40) TZYTOVICH N.A., UKHOVA N.V., UKHOV S.B. Prediction of the temperature stability of earth and rockfill dams on permafrost foundations. L. Stroyizdat, 1972, 140 p.
- (41) VORONKOV O.K., USHAKOVA L.F. Regularities in disintegration of rock and coarse-grained soil under the impact of physical weathering. Izvestiya VNIIG. Bases, foundations and underground structures, 1996, v. 231, p. 25-45.
- (42) ZISKOVICH V.H., KRIVONOGOVA N. F. The influence of geocryological characteristics of construction site on design decisions for Viluiskaya HPP-III. Power Engineering Construction, 1986, No 8, p. 53-55.

ANNEXE A

LISTE DES BARRAGES MENTIONNÉS DANS CE BULLETIN

Tableau 1
Liste des barrages mentionnés dans ce Bulletin

N°	Nom du barrage (de la rivière)	Pays	Année d'achèvement des travaux de construction	Paramètres du barrage			Type et matière de la zone imperméable				Matériaux des massifs de recharge du barrage	État du barrage	Type de surveillance
				Hauteur maximale et longueur de la crête (m)	Rapport de la pente : massif amont / massif aval	Matériaux terreux des fondations	Dans les fondations	Dans le corps du barrage	Matériaux de la zone imperméable dans le corps du barrage				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Kolymskaïa (Kolyma)	Russie	1989	Barrage en terre et en enrochements dégelés	130/800	1:1,8/1:1,7	Granites très fissurés $t_{\text{moy}} = -9^{\circ}\text{C}$, talik ouvert sous le lit du cours d'eau	Rideau d'injection	Noyau	Loams avec blocailles et galets	Enrochement de granite masse volumique 1,90 t/m ³	En exploitation	Examens habituels, jeu d'instruments Études scientifiques périodiques
2	Kureiskaïa (Kureika)	Russie	1991	Barrage en terre et en enrochements dégelés	81,5/4315	1:2,0*3,0/1:2,0*4,0	Roches dans les cuîées des rives recouvertes dans le lit par 40 m de couches de sables, de loams, de loams sableux, d'argiles et de graviers	Aucun	Noyau et couche	Loams, loams sableux	Massif de recharge amont de sol graveleux avec loam, massif de recharge aval et base de sol graveleux et sableux	En exploitation. Percolation / suffosion et déformations déclarées en 1992 et en 1995	Examens habituels, jeux d'instruments, explorations et études supplémentaires
3	Vitanskaïa I and II (Vilu)	Russie	1970	Barrage en terre et en enrochements dégelés	74,5/600	1:1,8*3,0/1:1,4*2,0	Dolérites avec xénolites de roches sédimentaires $t_{\text{moy}} = -8^{\circ}\text{C}$, talik de >90 m d'épaisseur sous le lit du cours d'eau	Rideau d'injections	Noyau incliné	Loams avec blocailles de dolérite, et galets	Enrochement de dolérite, masse volumique 1,95 t/m ³	En exploitation	Examens habituels, jeu d'instruments. Études scientifiques périodiques

ANNEXE A LIST OF DAMS MENTIONED IN THIS BULLETIN

Table 1
List of dams mentioned in this Bulletin

Serial Number	Name of dam (river)	Country	Year of completion of construction	Dams parameters			Type and material of impervious zone						Monitoring provision
				Maximum height crest length m	Slope ratio : upstream slope / downstream slope	Foundation soils	In the foundation	In dam body	Material of impervious zone in dam body	Dam shell material	Dam status		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Kolymskaya (Kolyma)	Russia	1989	Thawed type earth-rockfill dam	130/800	1:1.8/1:1.7	Heavily fissured granites, t_w up to -9°C, open talk below the river bed	Grout curtain	Core	Loams with rubbles and pebbles	Granite rockfill 1.90 t/m^3 density	Operating	Routine examination, instrumentation set, Periodic research studies
2	Kureiskaya (Kureika)	Russia	1991	Thawed type earth-rockfill dam	81.5/4315	1:2.0*3.0/1:2.0-4.0	Rock in bank abutments covered in the riverbed by 40 m layered mass of sands, loams, sandy loams, clays and gravels	None	Core and blanket	Loams, sandy loams	Upstream shell of gravelly soil with loam, downstream shell and base of sandy-gravelly soil	Operating. Seepage / suffusion and induced deformations reported in 1992 and 1995	Routine examination, instrumentation set, additional explorations and research studies
3	Vilinskaya I and II (Vilui)	Russia	1970	Thawed type earth-rockfill dam	74.5/600	1:1.8*3.0/1:1.4*2.0	Dolerites with xenoliths of sedimentary rock, t_w up to -8°C, talk of >90 m thickness under the riverbed	Grout curtain	Inclined core	Loams with dolerite rubbles and pebbles	Dolerite rockfill 1.95 t/m^3 density	Operating	Routine examination, instrumentation set, Periodic research studies

4	Barrage au fil de l'eau d'Ust-Khan-taiskaïa (Khantaïka)	Russie	1975	Barrage en terre et en enrochements dégelés	70/420	1:1,4+2,0/1:1,4+2,0	Soils sableux à galets dégélés reposant sur des dolérites, t_{moy} pouvant atteindre -9 °C	Rideau d'injections	Noyau	Loams (moraine) avec blocailles et galets	Enrochement de dolérite	En exploitation	Examens habituels, jeu d'instruments, Essais sur place périodiques et études théoriques
5	Barrage de la rive droite d'Ust-Khan-taiskaïa (Khantaïka)	Russie	1975	Barrage en terre et en enrochements dégelés	33/	1:2,75/1:2,5	De haut en bas : loams lacustres-glaciaires, argiles à varves, moraine, calcaires dégélés avec lentilles gelées	Systèmes de drains verticaux et horizontaux utiles pour consolider les matériaux terreux des fondations	Noyau	Moraine sableuse-loameuse et loams lacustres/glaciaires	Massif de recharge amont : masse rocheuse de sols de type carbonaté, massif de recharge aval : sols de gravier sableux et sols de gravier et de galets	En exploitation	Examens habituels, jeu d'instruments, études scientifiques périodiques
6	Barrage de la rivière Amman-nychan	Russie	1978	Barrage en terre et en enrochements dégelés	195/92	1:1,4/1:1,4	Argiles litées recouvertes de 5-6 m de sols sableux et graveleux à galets	Aucun	Aucun	Loams avec blocailles et galets	Enrochement de granite	En exploitation	Examens habituels, jeu d'instruments
7	Barrage de la CN de Bil-bmskaïa (Pon-neurgen)	Russie	1977	Barrage en matériaux meubles dégelés	16/680	1:2,5/1:2,0	Soils de gravier à galets, avec matière de charge sableuse et loameuse, pouvant atteindre 8 m d'épaisseur, reposant sur des grès et des schistes métamorphiques, gélés et riches en glace (t_w -3,6°C)	Pied de barrage de loam, dalle de béton avec un rideau d'injections à 15 m de profondeur	Noyau	Loams	Sols de gravier et de galets	En exploitation avec de fortes percolations et des déformations tolérables (asselements, fissures) dus au dégel et au thermokars dans les fondations	Examen périodique, études scientifiques, jeu d'instruments
8	Barrage sur la rivière Kame-nousika	Russie	1960	Barrage en matériaux meubles dégelés	15,5/222	1:3+3,5/1:1,15	Granodiorites fissurées chevauchées par des sols dégélés de type galets-gravier ou blocailles-gravier	Tranchée parafoinille de matériaux loameux à 10 m de profondeur, avec un rideau d'injections creusé pouvant atteindre 5 m	Noyau incliné	Loams	Enrochement de diorite et sols de gravier et de galets	En exploitation	Examen périodique

4	Ust-Khantaiska ya run-of- river dam (Khantaika)	Russia	1975	Thawed type earth-rockfill dam	70/420	1:1.4:2.0/1:1.4:2.0	Thawed sandy-pebble soils underlain by dolerites, t_{av} up to -9°C	Grout curtain	Core	Loams (moraine) with rubbles and pebbles	Dolerite rockfill	Operating	Routine examination, instrumentation set. Periodic in-situ tests and calculation studies
5	Ust-Khantaiska ya right- bank dam (Khantaika)	Russia	1975	Thawed type earth-rockfill dam	33/	1:2.75/1:2.5	From top to bottom : lacustrine-glacial loams, varved clays, moraine, thawed limestones with frozen lenses	Systems of vertical and horizontal drains for consolidating the foundation soils	Core	Sandy-loamy and loamy moraine and lacustrine / glacial loams	Upstream shell : rock mass of carbonate soils, downstream shell : sandy-gravel and gravelly-pebble soils	Operating	Routine examination, instrumentation set. Periodic research studies
6	Dam on Amman- nychan River	Russia	1978	Thawed type earth-rockfill pilot dam	19.5/92	1:1.4/1:1.4	Clay shales covered by 5-6 m of sandy-gravelly pebbles soils	None	Core	Loams with rubbles and pebbles	Granite rockfill	Operating	Routine examination, instrumentation set
7	Dam of Bil- binskaya NPP (Pon- neugen)	Russia	1977	Thawed type embankment dam	16/680	1:2.5/1:2.0	Pebble and gravel soils with sandy/loamy filler; up to 8 m thick lying on metamorphic sandstones and shales, frozen and ice-rich (t_{av} -3,6°C)	Dam toe of loam, concrete slab with a grout curtain to 15 m depth	Core	Loams	Gravel-pebble soils	Operating with heavy seepage losses and allowed deformations (settlements, fissures) due to thawing and thermokarst in the foundation	Periodic examination, scientific research, instrumentation set
8	Dam on Kame- nousika River	Russia	1960	Thawed type embankment dam	15.5/222	1:3+3.5/1:1.15	Fissured granodiorites overlapped by pebble-gravel, rubble-gravel thawed soils	Laomy key trench to 10 m depth with a grout curtain below down to 5 m	Inclined core	Loams	Diorite rockfill and gravel-pebbles soils	Operating	Periodic examination

9	Anadyrskaya (ancien barrage) (Kazachka)	Russie	1964	Barrage en matériaux meubles dégelés	8,5/500	1:2,5-3,0/1:2,0	Loams riche en glace avec de nombreuses veines de glace jusqu'à 8 m de profondeur, reposant sur des loams et des argiles pauvres en glace (-3 à -5°C) sans percolation après le dégel	Tranchée parafoville du barrage en loam sableux et en loam	Noyau central	Sables fins et loams sableux	Sables graveleux et entrochement d'andésite	Exploité pendant plus de 20 ans avec des déformations tolérables (fissures sur la crête du barrage) dues au dégel des fondations	Examens habituels, jeu d'instruments
10	Kadyk-tchanskaïa (ruisseau Kadykchan)	Russie	1966	Barrage en matériaux meubles dégelés	8/574	1:2,5/1:2,0	Argiles litées fissurées chevauchées par des sols glacés de blocailles et de gravier, de loams sableux et de gravier loameux	Pied de barrage de loam à blocailles, partiellement lié par injection	Noyau	Loams graveleux	Sols loameux, graveleux et sableux	Exploitation compliquée par des cas de suffusion dans les culées, dus à la fonte de la glace dans les sols	Inconnu
11	Sredny-Elgenskaïa (ruisseau Sredny Elgen, affluent de la rivière Kolyma)	Russie	1945	Barrage en matériaux meubles dégelés	7,6/450	1:2,0/1:2,0	Galets avec sables et sables loameux reposant sur des argiles à lentilles de glace	Tranchée parafoville de loam avec des poutres de bois enfoncés profondément dans les fondations	Noyau incliné, diaphragme mince avec couverture	Loams	Gravier grossier avec matière de charge sableuse et loameuse	Exploitation accompagnée par des opérations de colmatage des fissures transversales dans le corps du barrage et les fondations, dues à des tassements inégaux au niveau des fondations dégelées	Observations visuelles périodiques
12	Barrage de la rivière Pravaya Magdagacha	Russie	1932	Barrage en matériaux meubles dégelés	7,3/350	1:2,0/1:2,0	Dépôts de 5 m d'épaisseur reposant sur des porphyres et des tufs fissurés et glacés	Béton	Diaphragme	Béton	Loams graveleux	Détruit (forte fissuration dans le diaphragme et les culées du déversoir et le barrage) due au dégel des fondations, à la percolation et à des tassements inégaux	Inconnu

9	Anadyrskaya (old) (Kazelka)	Russia	1964	Thawed type embankment dam	8,5/500	1.2,5,3,0/1.2,0	Ice-rich loams with repeatedly veined ice to 8 m depth overlying ice-poor loams and clays of -3° -5° C non-seeping after thawing	Dam key trench from sandy loam and loam	Central core	Fine sands and sandy loams	Gravelly sands and andesite rockfill	Operated over 20 years with allowed deformations (fissures on dam crest) due to foundation thawing	Routine examination, instrumentation set
10	Kadyk-tchanskaya (Kadykchan creek)	Russia	1966	Thawed type embankment dam	8/574	1.2,5/1.2,0	Fissured clay shales overlapped by icy rubble-gravel, sandy loams, loamy gravel soils	Dam toe of rubble loam, partly grouted	Core	Gravel loams	Sandy loamy-gravelly soils	Operation was complicated by suffusion in abutments due to ice thawing in the soils	Missing
11	Sredne-Elgenskaya (Sredny Elgen creek, tributary of Kolyma river)	Russia	1945	Thawed type embankment dam	7,6/450	1.2,0/1.2,0	Pebble with sands and loamy sands underlain by clays with ice lenses	Key trench of loam with wooden beams extending deeper in the foundation	Inclined core, thin diaphragm with blanket	Loams	Coarse gravel with sandy-loamy filler	Operation was accompanied by plugging transverse fissures in dam body and foundation, formed as a result of uneven settlements of thawing foundation	Periodic visual observations
12	Dam on Pravaya Magdagacha river	Russia	1932	Thawed type embankment dam	7,3/350	1.2,0/1.2,0	5 m thick alluvial deposits overlying icy fissured porphyrites and tuffs	Concrete	Diaphragm	Concrete	Gravelly loams	Destroyed (heavy fissuring in diaphragm and abutments of spillway and embankment dam) due to foundation thawing, seepage, uneven settlements	Missing

13	Barrage de la Glukhar	Russie	1969	Barrage en matériaux meubles gelés	36/600	1:2,5/1:2,0	Sols de gravier et de galets sur des roches fortement fissurées, pratiquement imperméables à partir de 30 m de profondeur	Bouclier de glace à 43 m de profondeur	Mur de glace et de matériaux terreux	Loams	Sols graveleux - sableux	En exploitation	Examens périodiques
14	Syv-kanskaia (Syt'kan)	Russie	1969	Barrage en matériaux meubles gelés	22/600	1:3,0/1:2,0	Calcaire, dolomite, marne, grès [température pouvant atteindre -3 °C avec un coefficient de perméabilité de 50-300 m ³ /jour (après le dégel)]	Bouclier de glace central à 4-7 m sous la base de la tranchée parafouille	Noyau et tranchée parafouille à 2-3 m profondeur	Loams	Enrochement provenant de matériaux d'excavation rocheux et semirocheux, masse volumique : 1,95 t/m ³	En exploitation, après 20 années d'exploitation. Percolation dans les fondations à un débit maximal de 3 200 m ³ /h. Mesures anti-percolation appliquées	Examens habituels, jeu d'instruments, études périodiques
15	Pevek-skaia (Pevek)	Russie	1967	Barrage en matériaux meubles gelés	21,5/464	1:2,5/1:1,75	Argiles liées recouvertes de sols de type gravier-bocailles-blocs avec des loams sableux contenant des lentilles de glace enfouies (moy pouvant atteindre -7 °C)	Bouclier de glace à 20 m de profondeur. Système frigorifique à l'air	Mur central de glace et de matériaux terreux		Sol de gravier et de bocailles avec matière de charge sableuse et loameuse	Rupture du barrage après 3 ans d'exploitation. Reconstitué. Réparations périodiques à cause d'un processus de percolation-suffosion	Examens habituels, jeu d'instruments
16	Barrage de la rivière Irgout-chane	Russie	1982	Barrage en matériaux meubles gelés	20/245	1:3,0/1:2,5	Roches gelées extrusives et sédimentaires du créacé recouvertes de dépôts alluviaux et diluants pouvant atteindre 4 m d'épaisseur	Bouclier de glace à 30 m de profondeur. Système liquide à circulation forcée	Mur central de glace et de matériaux terreux	Sols de loam sableux et de bocailles	Sol sableux de limon et de bocailles (coefficient de perméabilité : 0,01 m/jour), massifs de recharge en enrochement dans la partie aval	En exploitation	Examens habituels, jeu d'instruments
17	Ana-dyrskaia (nouveau barrage) (Kazachka)	Russie	1986	Barrage en matériaux meubles gelés	17/1 331	1:2,0/1:3,0	Loams riches en glace avec nombreuses veines de glace jusqu'à 8 m de profondeur, reposant sur des loams et des argiles pauvres en glace (-3 à -5 °C) imperméables après le dégel	Bouclier de glace, système vapeur-liquide atteignant la couche de sol imperméable	Massifs de recharge centraux de glace - matériaux terreux	Loams avec graviers et bocailles	Gruvier et bocailles d'andésite et tuils avec loam. (jusqu'à 40 %)	En exploitation	Examens habituels, jeu d'instruments, étude périodique

13	Dam on Glukhar river	Russia	1969	Frozen type embankment dam	36/600	1:2.5/1:2.0	Gravel-pebble soils on heavily fissured rock, practically impermeable from 30 m depth	Frozen shield to 43 m depth	Ice-soil wall	Loams	Sandy-gravelly soils	Operating	Periodic examinations
14	Syty-kanskavja (Sytykan)	Russia	1969	Frozen type embankment dam	22/600	1:3,0/1:2,0	Limestone, dolomite, marl, sandstone [temperature of up to -3°C with permeability coefficient 50-300 m/day (after thawing)]	Central frozen shield 4-7 m deeper than key trench base	Core and key trench to 2-3 m depth	Loams	Rockfill from rock and semirock excavations 1.95 t/m ³ density	Operating. After 20 years of operation, seepage in the foundation up to 3 200 m ³ /h. Antiseepage repair work took place	Routine examination, instrumentation set, periodic research
15	Pevek-skaya (Pevek)	Russia	1967	Frozen type embankment dam	21,5/464	1:2,5/1:1,75	Clay shales overlaid by gravel-rubble-block soils with sandy loams containing buried ice lenses (fav up to -7°C)	Frozen shield to 20 m depth air refrigerating system	Central ice-soil wall		Gravel-rubble soil with sandy loamy-filler	Dam failed after 3 years of operation. Reconstructed. Undergoes periodic repairs due to seepage-suffusion processes	Routine examination, instrumentation set
16	Dam on Iguchan river	Russia	1982	Frozen type embankment dam	20/245	1:3,0/1:2,5	Frozen effusive and sedimentary rock of Cretaceous age, overlaid by alluvial and deluvial deposits up to 4 m thick	Frozen shield 30 m deep, liquid system with forced circulation	Central ice-soil wall	Sandy loam-rubble soils	Sandy silty-rubble soil (Permeability coefficient = 0,01 m/day), rockfill shell in downstream part	Operating	Routine examination, instrumentation set
17	Anadyskaya (new) (Kazakhka)	Russia	1986	Frozen type embankment dam	17/1 331	1:2,0/1:3,0	Ice-rich loams with repeatedly veined ice to 8 m depth, deeper-ice-poor loams and clays (-3,5°C) impermeable after thawing	Frozen shield, steam-liquid system down to impervious soil	Central ice-soil shell	Loams with gravels and andesite rubbles up to 40 %	Andesite gravel and rubbles and tufts with loam, up to 40 %	Operating	Routine examination, instrumentation set, periodic research

18	Rive de l'Arctique	Russie	1968	Barrage en matériaux meubles gelés	15,6/370	1:2,0/1:1,5	Argiles liées gelées (-5, -6 °C) recouvertes par des sols de type gravier et galets et de type sableux et loameux, avec des lentilles de glace	Bouclier de glace, système liquide	Noyau gelé	Sables	Parties amont et centrale : sables; partie aval : sols de schistes et de blocailles	En exploitation; systèmes frigorifiques et isolant thermique restaurés plusieurs fois	En exploitation; systèmes frigorifiques et isolant thermique restaurés plusieurs fois
19	Irelyakh-skaia (Irelyakh)	Russie	1964	Barrage en matériaux meubles gelés	12/320	1:4,0/1:3,0	Roche sédimentaire fissurée recouverte de sols sableux-loameux et loameux	Bouclier de glace, système frigorifique à l'air	Noyau gelé	Loams	Massif de recharge amont : sables; massif de recharge aval : loam	Exploitation compliquée à cause de déformations dues au percolation et à la suffosion pendant le dégel des fondations	Examen périodique, jeu d'instruments
20	Barrage de la rivière Myaundja	Russie	1954-1959	Barrage en matériaux meubles gelés	11,5/870	1:2,0/1:1,5	Galets avec lentilles de boue et de tourbe reposant sur des basaltes andésitiques broyés, saturés de glace	Bouclier de glace au-dessus du pied jusqu'à 22 m de profondeur; système frigorifique à l'air	Noyau gelé	Loams gravelleux	Sols de gravier et de galets avec sable	Exploitation souvent compliquée par l'apparition de fortes percolations, ainsi que de fissures et de vides dans le corps du barrage, pendant le gel et le dégel des fondations. Maintenant exploité comme un barrage de type dégelé	Examen périodique, études, jeu d'instruments
21	Barrage du lac Doigoye	Russie	1942	Barrage en matériaux meubles gelés	10/130	1:5,0/1:3,0	Loams gelés et glacés et loams sableux	Tranchée paraouille d'argile-béton à 3,6 m de profondeur; bouclier de glace et système frigorifique à l'air	Noyau d'argile et de béton et couche de matériaux loameux et argileux	Argile-béton	Sables mis en place couche par couche, gelés	En exploitation. Système frigorifique et isolant thermique restaurés plusieurs fois	Examens habituels, jeu d'instruments

18	On the Arctic shore	Russia	1968	Frozen type embankment dam	15,6/570	1:2,0/1:1,5	Frozen (-5, -6°C) clay shales overlaid by gravel-pebble and sandy-loamy soils with ice lenses	Frozen shield, liquid system	Frozen core	Sands	Upstream and central parts : sands ; downstream part : shales rubble soils	Operating : systems of refrigeration and heat insulation repeatedly rehabilitated	Routine examination, instrumentation set
19	Irelyakh-skaya (Irelyakh)	Russia	1964	Frozen type embankment dam	12/320	1:4,0/1:3,0	Fissured sedimentary rock overlaid by sandy-loamy and loamy soils	Frozen shield aerial refrigeration system	Frozen core	Loams	Upstream shell : sands ; downstream shell : loam	Operation complicated by seepage-suffusion deformations during foundation thawing	Periodic examination, instrumentation set
20	Dam on Myaundzha river	Russia	1954-1959	Frozen type embankment dam	11,5/870	1:2,0/1:1,5	Pebbles with mud and peat lenses underlain by crushed andesite-basalts, ice saturated	Frozen shield over toe section down to 22 m depth aerial refrigerating system	Frozen core	Gravelly loams	Gravel-pebble soils with sand	Operation repeatedly complicated by fissures and gaps formed in dam body, intensive seepage losses during dam and foundation thawing. Presently operates as thawed type dam	Periodic examination, research, instrumentation set
21	Dam on Dolgoye lake	Russia	1942	Frozen type embankment dam	10/130	1:5,0/1:3,0	Frozen and icy loams and sandy loams	Clay-concrete key trench to 3,6 m depth ; frozen shield aerial refrigeration system	Clay-concrete core and clayey loamy blanket	Clay concrete	Sands placed with layer-by-layer freezing	Operating. Refrigerating and heat insulating systems repeatedly rehabilitated	Routine examination, instrumentation set

ANNEXE B

CAPTIONS TO FIGURES AND FIGURES LES FIGURES ET LEURS LÉGENDES

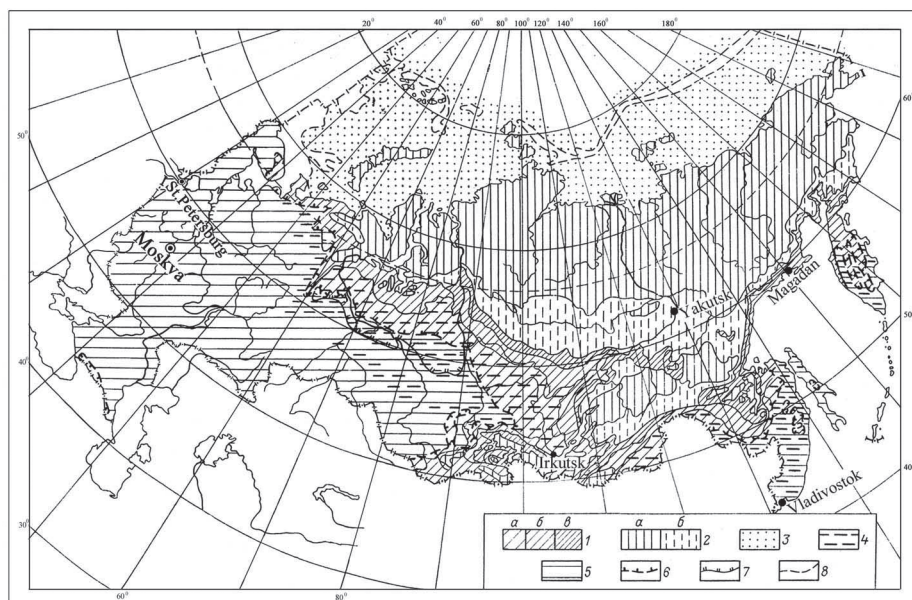


Fig. 1

Perennially and seasonally frozen ground distribution map (according to K. Kondratiyeva)
Carte de répartition des sols gelés en permanence et de façon saisonnière (selon K. Kondratiyeva)

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1) Southern geocryological zone (discontinuous distribution of permafrost) a) Rare-insular and insular (frozen ground not exceeding 25% of the area) b) Massive-insular (25-75%) c) Discontinuous (75-90%) 2) Northern geocryological zone (continuous distribution of permafrost) b) Northern subzone (over 95%) c) Southern subzone (90-95%) 3) Arctic offshore cryolythozone 4) Short-term permafrost, possibly permafrost islands 5) Seasonal and short-term permafrost zone 6) Southern boundary of present-day permafrost distribution 7) Southern boundary of relic permafrost distribution 8) Offshore cryolythozone boundary | <ol style="list-style-type: none"> 1) Zone géocryologique du Sud (répartition discontinue du pergélisol) a) Rare et insulaire et insulaire (aire maximale du sol gelé, 25%) b) Massif et insulaire (25-75%) c) Discontinu (75-90%) 2) Zone géocryologique du Nord (répartition continue du pergélisol) b) Sous-zone du Nord (plus de 95%) c) Sous-zone plus au Sud (90-95%) 3) Zone cryolithique extracôticière de l'Arctique 4) Pergélisol de courte durée, qui recouvre peut-être les îles 5) Zone de pergélisol saisonnier et de courte durée 6) Limite sud de la répartition du pergélisol, à ce jour 7) Limite sud de la répartition des restes de pergélisol 8) Limite de la zone cryolithique extracôticière |
|---|--|

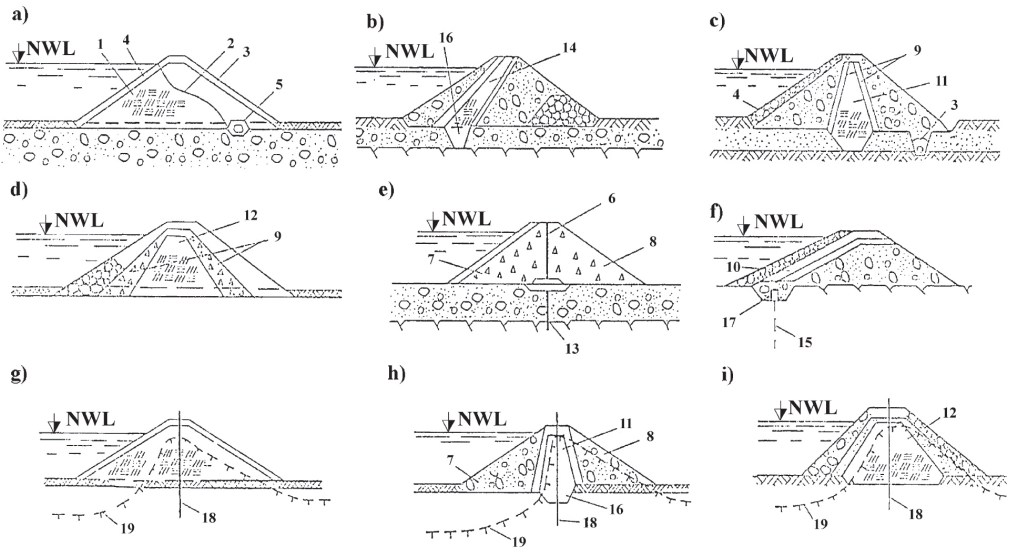


Fig. 2

Types of fill dams constructed in the northern climatic zones

NWL : Normal Water Level

Types de barrages en matériaux meubles construits dans les zones climatiques du Nord

NWL : Niveau d'Eau Normal

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1) Dam body | 1) Corps du barrage |
| 2) Free surface of seepage | 2) Surface de percolation libre |
| 3) Drainage | 3) Drainage |
| 4) Slope stiffening | 4) Raidisseur de pente |
| 5) Heat insulating layer | 5) Couche d'isolant thermique |
| 6) Diaphragm | 6) Diaphragme |
| 7) Upstream shell | 7) Massif de recharge amont |
| 8) Downstream shell | 8) Massif de recharge aval |
| 9) Filter or transition layer | 9) Filtre ou couche de transition |
| 10) Diaphragm from non-soil materials | 10) Diaphragme de matériaux non terreux |
| 11) Soil-core | 11) Noyau de matériaux terreux |
| 12) Central impervious soil-core | 12) Noyau central imperméable de matériaux terreux |
| 13) Pilework or cutoff wall | 13) Pieux ou écran parafouille |
| 14) Inclined impervious soil-core | 14) Noyau de matériaux terreux incliné imperméable |
| 15) Grout curtain | 15) Rideau d'injections |
| 16) Cutoff zone or key trench | 16) Zone du rideau d'étanchéité ou tranchée parafouille |
| 17) Grouting gallery | 17) Galerie d'injection |
| 18) Refrigerating system | 18) Système frigorifique |
| 19) Thawed and frozen soil interface | 19) Interface entre le sol dégelé et le sol gelé |

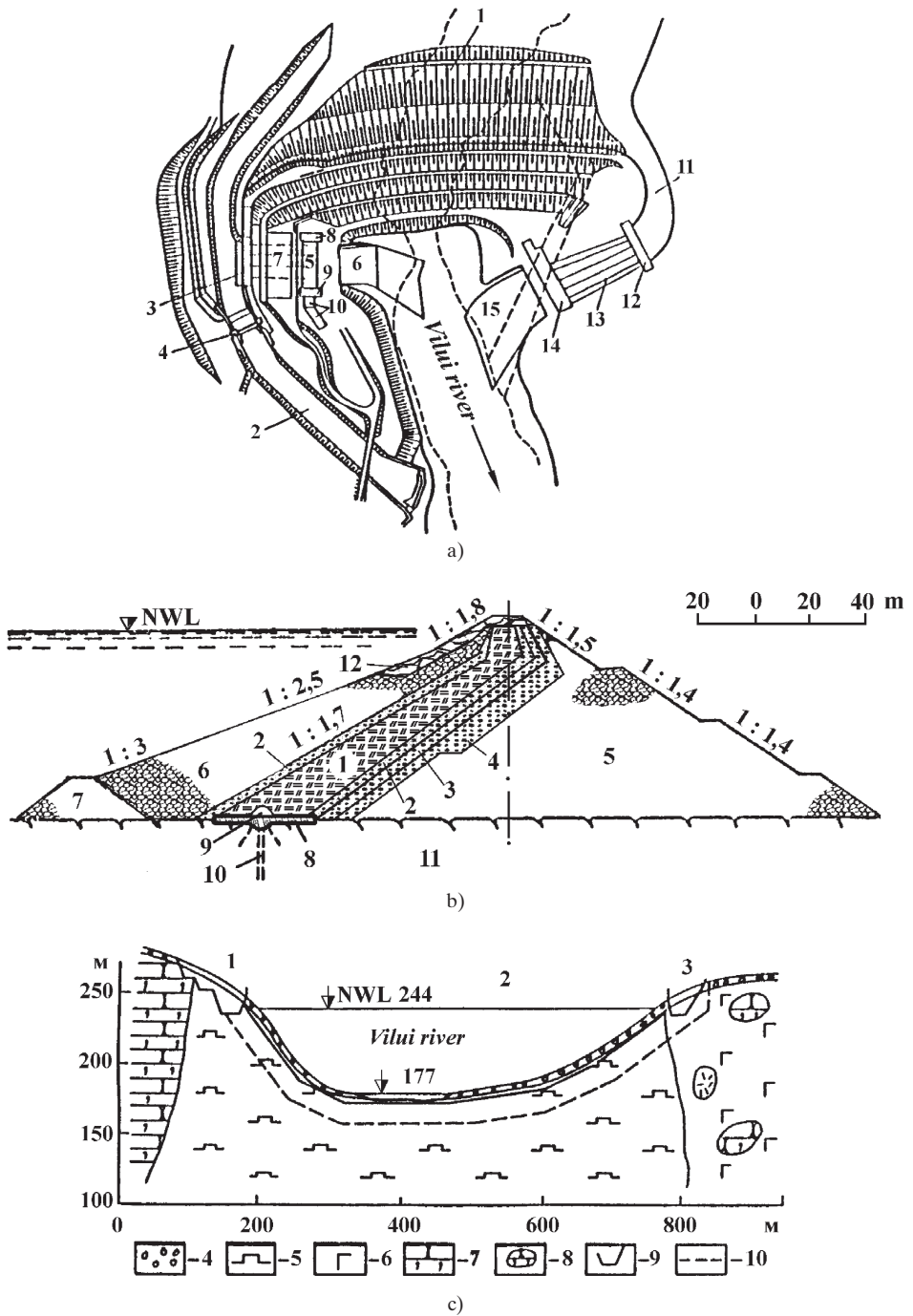
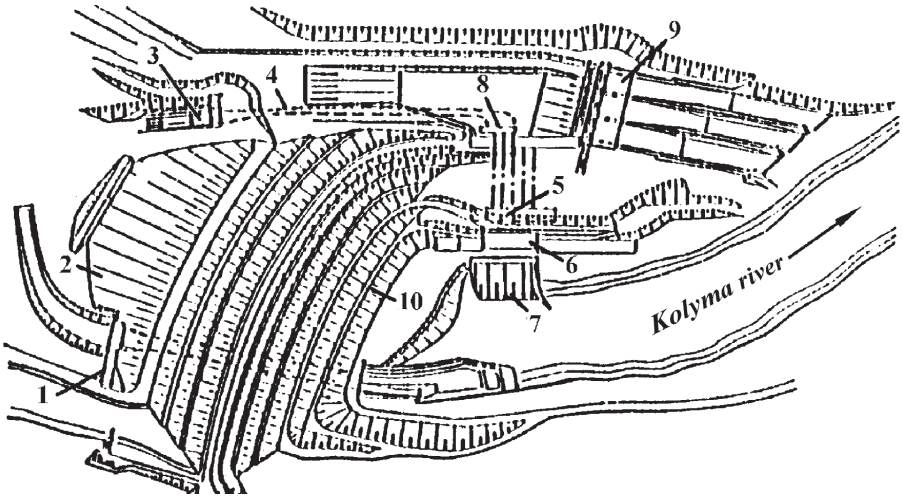


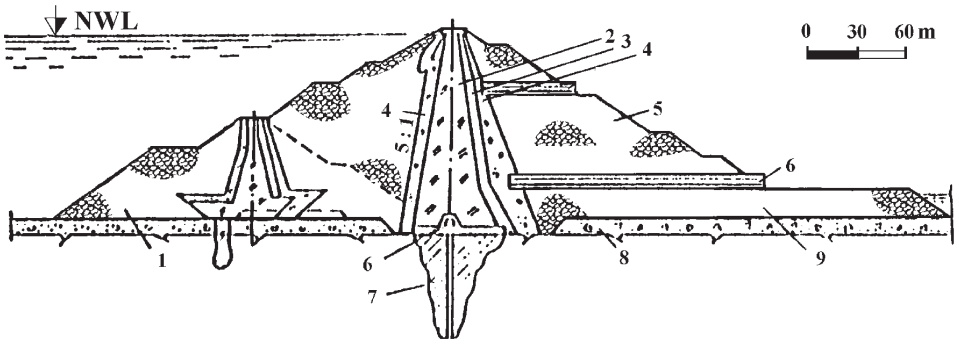
Fig. 3
 Dam of Viluiskaya HPP
 Barrage de la CH de Viluiskaïa

Fig. 3
 Dam of Viluiskaya HPP
Barrage de la CH de Viluiskaïa

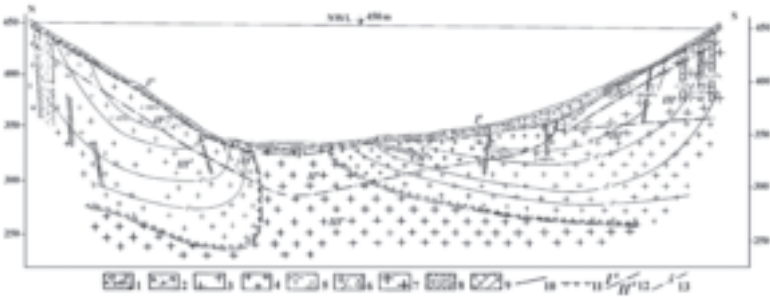
a) Plan view	a) <i>Vue en plan</i>
Structures of the first construction stage	<i>Ouvrages de la première étape de la construction</i>
1) Dam	1) <i>Barrage</i>
2) Spillway channel	2) <i>Déversoir</i>
3) Water intake	3) <i>Prise d'eau</i>
4) Spillway structure	4) <i>Structure du déversoir</i>
5) Powerhouse	5) <i>Centrale électrique</i>
6) Outlet channel	6) <i>Canal d'évacuation</i>
Structures of the second construction stage	<i>Ouvrages de la deuxième étape de la construction</i>
7) Inlet channel	7) <i>Canal d'entrée</i>
8) Water intake	8) <i>Prise d'eau</i>
9) Pressure conduits	9) <i>Conduites sous pression</i>
10) Powerhouse	10) <i>Centrale électrique</i>
11) Left bank intake channel	11) <i>Canal d'alimentation de la rive gauche</i>
12) Water intake	12) <i>Prise d'eau</i>
13) Penstocks	13) <i>Conduites forcées</i>
14) Powerhouse	14) <i>Centrale électrique</i>
15) Outlet channel	15) <i>Canal d'évacuation</i>
b) Dam cross section	<i>b) Section transversale du barrage</i>
1) Core of rubble-gravelly loam	1) <i>Noyau de loam de blocailles et de gravier</i>
2) Filter sand-gravel mix (particle diameter up to 40 mm)	2) <i>Mélange de sable et de gravier du filtre (diamètre maximal des particules : 40 mm)</i>
3) Filter and transition sandy-gravel mix (particle diameter up to 150 mm)	3) <i>Mélange de sable et de gravier du filtre et de la couche de transition (diamètre maximal des particules : 150 mm)</i>
4) Levelling layer of fine stone	4) <i>Couche nivelée d'empierrement fin</i>
5) Rockfill	5) <i>Enrochement</i>
6) Stone surcharge	6) <i>Surcharge de pierres</i>
7) Banquette	7) <i>Banquette</i>
8) Concrete slab	8) <i>Dalle de béton</i>
9) Gallery	9) <i>Galerie</i>
10) Grout curtain	10) <i>Rideau d'injections</i>
11) Dolerite	11) <i>Dolérite</i>
12) Riprap ($d_{50} = 80$ cm)	12) <i>Perré ($d_{50} : 80$ cm)</i>
c) Longitudinal schematic geological section of dam foundation	<i>c) Section géologique schématique longitudinale des fondations du barrage</i>
1) Left-bank channel	1) <i>Canal de la rive gauche</i>
2) Dam	2) <i>Barrage</i>
3) Right-bank channel	3) <i>Canal de la rive droite</i>
4) Alluvial-deluvial rubble gravel deposits	4) <i>Dépôts alluviaux-diluviens de gravier et de blocailles</i>
5) Holocrystalline strong dolerites	5) <i>Dolérites fortes de type holocristallin</i>
6) Weak palagonite dolerites	6) <i>Dolérites faibles de type palagonite</i>
7) Metamorphic sandstones, argillites, aleurolites, limestones	7) <i>Grès métamorphique, argilites, aleurolites, calcaires</i>
8) Xenolites of sedimentary and effusive rock	8) <i>Xénolites de roches sédimentaires et extrusives</i>
9) Outline of structural cutting-in	9) <i>Tracé de la coupe structurale</i>
10) Grout curtain outline	10) <i>Tracé du rideau d'injections</i>



a)



b)



c)

Fig. 4
 Dam of Kolymskaya HPP
 Barrage de la CH de Kolymskaja

Fig. 4
 Dam of Kolymskaya HPP
Barrage de la CH de Kolymskáïa

- | | |
|--|--|
| a) Plan view | a) <i>Vue en plan</i> |
| 1) Temporary spillway | 1) <i>Déversoir temporaire</i> |
| 2) Cofferdam | 2) <i>Batardeau</i> |
| 3) Temporary water intake | 3) <i>Prise d'eau temporaire</i> |
| 4) Temporary diversion | 4) <i>Dérivation temporaire</i> |
| 5) Underground powerhouse | 5) <i>Centrale électrique souterraine</i> |
| 6) Process-engineering building | 6) <i>Ateliers et locaux techniques</i> |
| 7) Powerhouse outlet channel | 7) <i>Canal d'évacuation de la centrale électrique</i> |
| 8) Permanent water intake | 8) <i>Prise d'eau permanente</i> |
| 9) Permanent spillway | 9) <i>Canal d'évacuation permanent</i> |
| 10) Main dam | 10) <i>Barrage principal</i> |
| b) Cross section | b) <i>Section transversale</i> |
| 1) Cofferdam | 1) <i>Batardeau</i> |
| 2) Sandy-loamy core | 2) <i>Noyau de sable et de loam</i> |
| 3) 1 st layer of downstream filter sand | 3) <i>Première couche de sable du filtre amont</i> |
| 4) 2 nd filter layer sand-gravel | 4) <i>Deuxième couche du filtre sable-gravier</i> |
| 5) Granite rockfill | 5) <i>Enrochement de granite</i> |
| 6) Grouting gallery | 6) <i>Galerie d'injection</i> |
| 7) Grout curtain | 7) <i>Rideau d'injections</i> |
| 8) Alluvial gravel-pebble soils | 8) <i>Sols de gravier et de galets alluviaux</i> |
| 9) Granite rockfill cap | 9) <i>Capuchon d'enrochement de granite</i> |
| c) Engineering-geological section of dam site | c) <i>Section technique-géologique du site du barrage</i> |
| 1) Alluvial gravel-pebble formations | 1) <i>Formations de graviers et de galets alluviaux</i> |
| 2) Deluvial crushed stone and lump formations | 2) <i>Formations de pierre concassée et de matériaux agglomérés diluviens</i> |
| 3) Biotite, medium and coarse-grained, porphyritic, perennially frozen, ice-saturated granites | 3) <i>Biotite à grains moyens et gros, granite porphyrique, gelés en permanence, granites saturés de glace</i> |
| 4) Biotite, medium and coarse-grained, porphyritic granites, weakened by cryogenic processes | 4) <i>Biotite à grains moyens et gros, porphyrique, affaiblie par des processus cryogéniques</i> |
| 5) Biotite, medium and coarse-grained, porphyritic granite, intensively altered by weathering | 5) <i>Biotite à grains moyens et gros, granite porphyriques, fortement altérés</i> |
| 6) Weathered granite | 6) <i>Granite altéré</i> |
| 7) Biotite, average and coarse-grained, porphyritic, thawed, water saturated granites | 7) <i>Biotite à grains moyens et gros, porphyrique, dégelée, granites saturés d'eau</i> |
| 8) Tectonic zones and ice content within their bounds | 8) <i>Zones tectoniques et teneur en glace à l'intérieur de leurs limites</i> |
| 9) Zones of heavily fissured granites | 9) <i>Zones de granites très fissurés</i> |
| 10) Geological-lithological boundaries | 10) <i>Limites géologiques-lithologiques</i> |
| 11) Permafrost boundaries | 11) <i>Limites du pergélisol</i> |
| 12) Boundaries and element numbers of engineering-geological zoning | 12) <i>Limites et numéros des éléments du Zonage technique-géologique</i> |
| 13) Isotherms | 13) <i>Isothermes</i> |

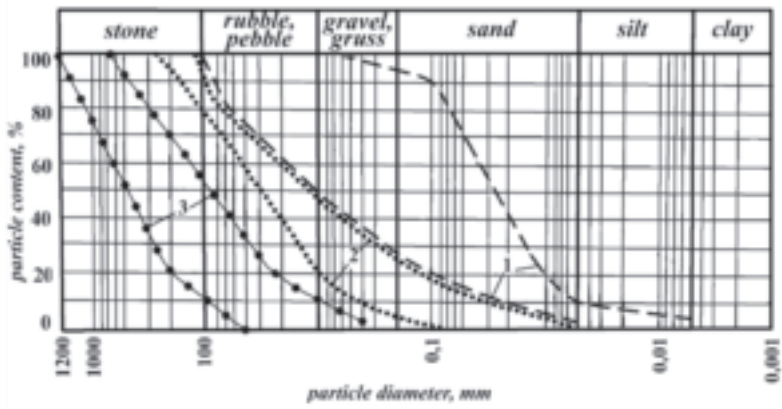


Fig. 5
 Grain size distribution boundary curves for soils placed into Kolymkaya HPP dam
*Courbes de limites granulométriques des matériaux terreux mis en place
 dans le barrage de la CH de Kolymkaïa*

Fig. 5
Grain size distribution boundary curves for soils placed into Kolymkaya HPP dam
*Courbes de limites granulométriques des matériaux terreux mis en place
dans le barrage de la CH de Kolymkaïa*

- 1) Dam core
- 2) Filter zones
- 3) Rockfill of shells

- 1) *Noyau du barrage*
- 2) *Zones de filtre*
- 3) *Enrochement des massifs de recharge*

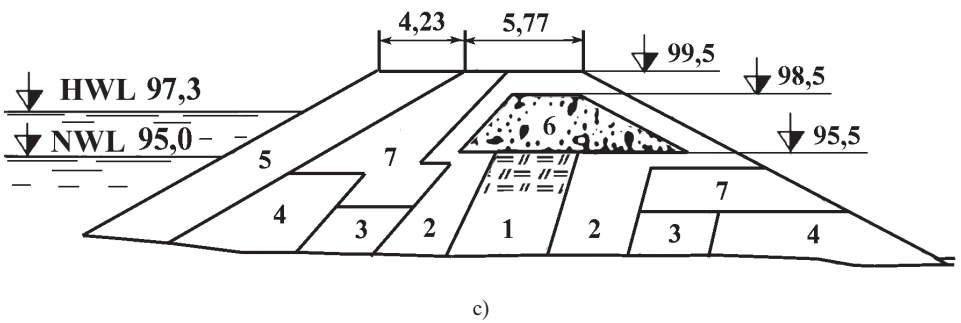
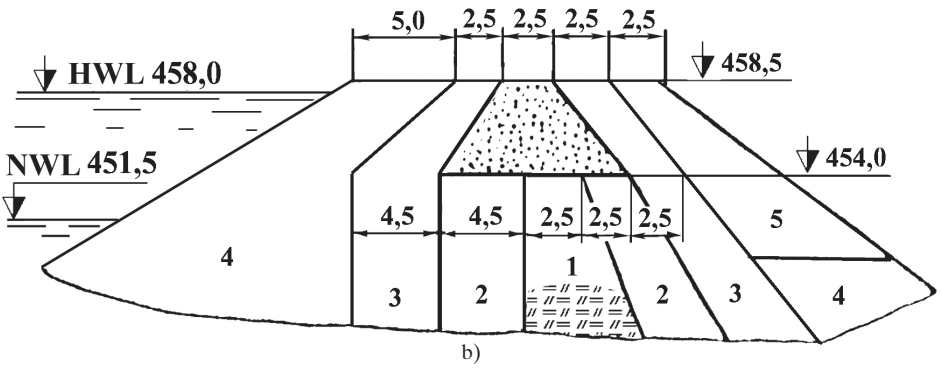
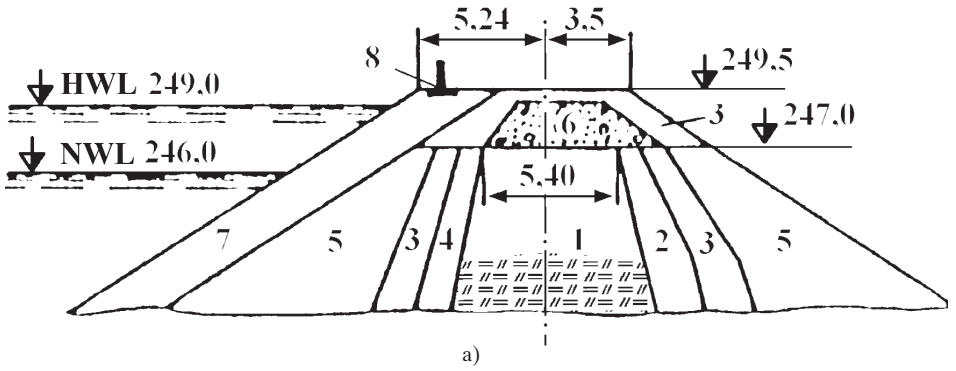
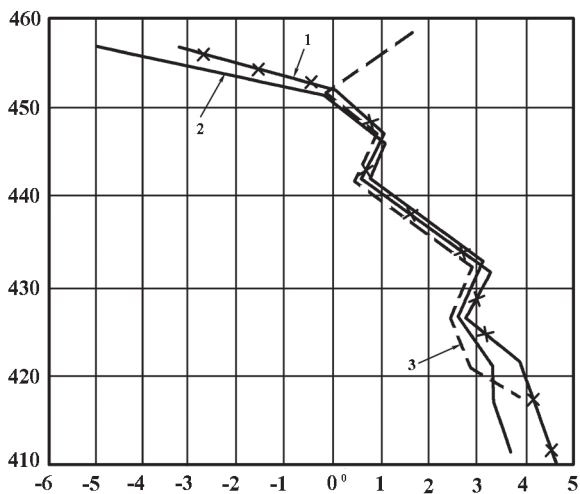


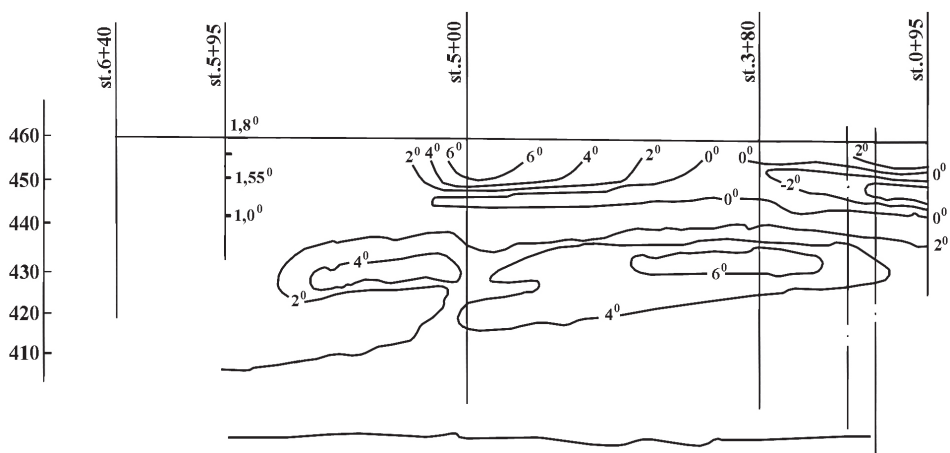
Fig. 6
Design of dam crest portion
Plan de la crête du barrage

Fig. 6
 Design of dam crest portion
Plan de la crête du barrage

- | | |
|--|--|
| a) Viluiskaya HPP-I,II | a) CH de Viluiskaïa-I, II |
| 1) Gravelly-loamy core | 1) Noyau de gravier-loam |
| 2) 1 st filter layer : 2-40 mm diameter crushed stone | 2) Première couche de filtre : pierre concassée de 2-40 mm de diamètre |
| 3) 2 nd filter layer : 10-150 mm diameter crushed stone | 3) Deuxième couche de filtre : pierre concassée de 10-150 mm de diamètre |
| 4) Sandy-gravel mix | 4) Mélange de gravier et de sable |
| 5) Rockfill | 5) Enrochement |
| 6) Sandy-gravel mix | 6) Mélange de gravier et de sable |
| 7) Riprap | 7) Perré |
| 8) Reinforced concrete parapet | 8) Parapet de béton armé |
| b) Kolymskaya HPP | b) CH de Kolymskaïa |
| 1) Core-crushed stone loam | 1) Noyau - pierre concassée et loam |
| 2) 1 st filter layer : 2-150 mm, sandy-gravel | 2) Première couche de filtre : 2-150 mm, gravier sableux |
| 3) 2 nd filter layer : 2-250 mm, gravelly-pebble | 3) Deuxième couche de filtre : 2-250 mm, galets et gravier |
| 4) Rockfill | 4) Enrochement |
| 5) Fine rockfill $D_{av} = 0.1$ m | 5) Enrochement fin, $D_{moy} : 0,1$ m |
| c) Kureiskaya HPP (run-of-river dam) | c) CH de Kureiskaïa (barrage au fil de l'eau) |
| 1) Loam | 1) Loam |
| 2) 1 st filter layer : 2-100 mm, sandy-gravel | 2) Première couche de filtre : 2-100 mm, gravier sableux |
| 3) 2 nd filter layer : 10-200 mm, gravelly-pebble | 3) Deuxième couche de filtre : 10-200 mm, galets et gravier |
| 4) Rockfill | 4) Enrochement |
| 5) Riprap | 5) Perré |
| 6) Sandy-gravel (≤ 10 mm) | 6) Gravier sableux (≤ 10 mm) |
| 7) Pebble (≥ 20 mm fractions) | 7) Galets (fractions ≥ 20 mm) |



a)



b)

Fig. 7

Temperature of dam core of Kolymkaya HPP

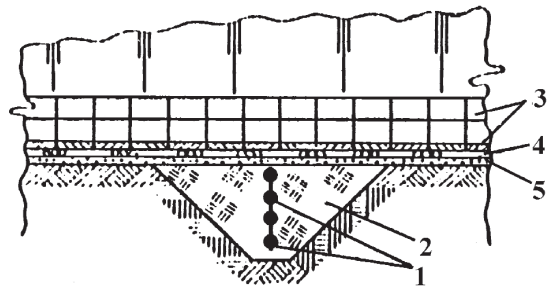
Température du noyau du barrage de la CH de Kolymkaïa

Fig. 7

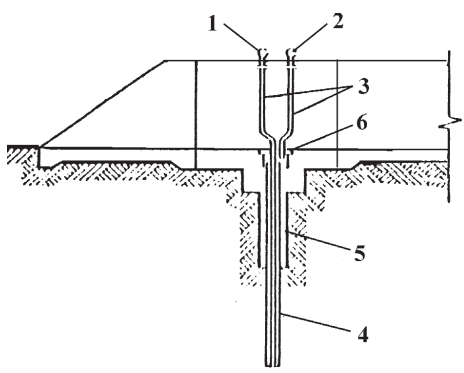
Temperature of dam core of Kolymskaya HPP

Température du noyau du barrage de la CH de Kolymskaïa

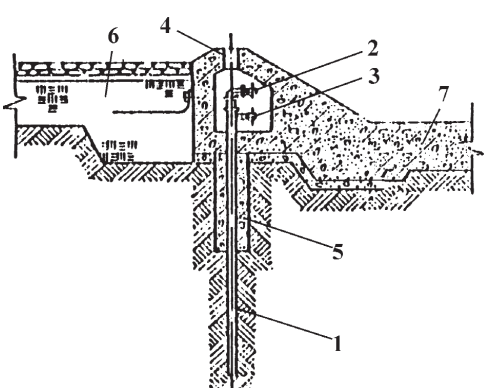
- | | |
|--|---|
| a) Temperature in the cone on station 6+40 | a) <i>Température dans le cône, à la station 6+40</i> |
| 1) – as per 15.01.92 | 1) – <i>en date du 15-01-92</i> |
| 2) – as per 12.05.92 | 2) – <i>en date du 12-05-92</i> |
| 3) – as per 30.09.92 | 3) – <i>en date du 30-09-92</i> |
| b) Temperature profile
as per 28.09.95 | b) <i>Profil des températures
en date du 28-09-95</i> |



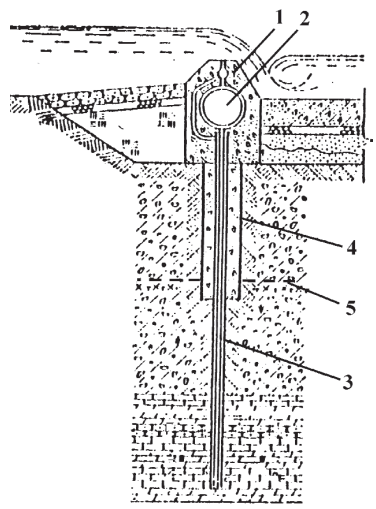
a)



b)



c)



d)

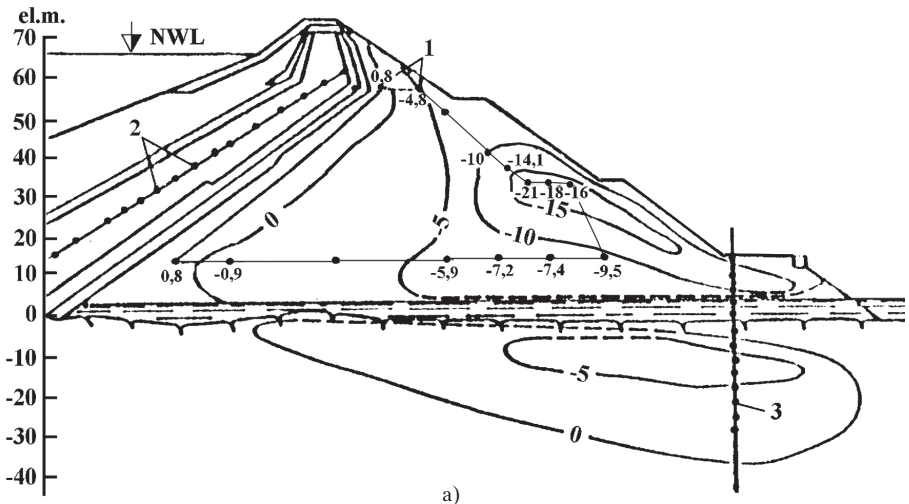
Fig. 8
Design of refrigerating systems
Modèles de systèmes frigorifiques

Fig. 8

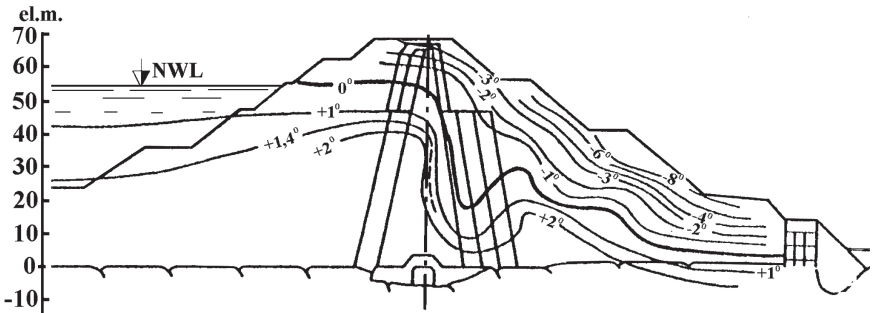
Design of refrigerating systems

Modèles de systèmes frigorifiques

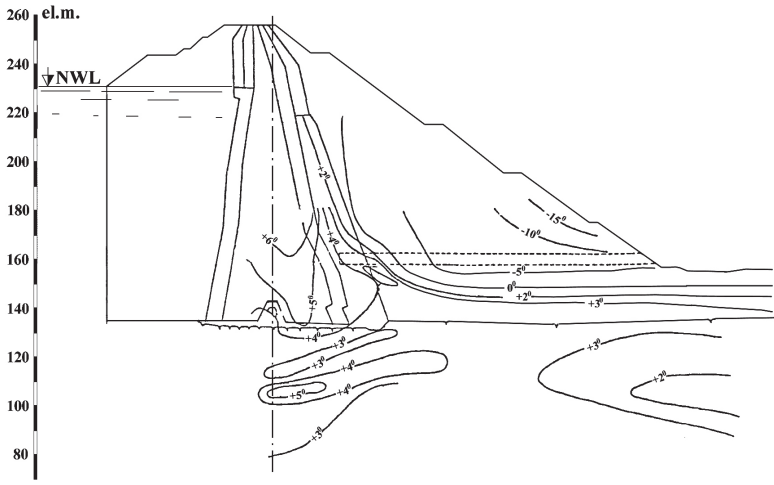
- | | |
|--|--|
| a) Aerial refrigerating system for spillway of Irelyakhskaya dam | a) <i>Système frigorifique à l'air, déversoir du barrage d'Irelyakhskaïa</i> |
| 1) Refrigerating pipes | 1) <i>Canalisations de réfrigération</i> |
| 2) Loam | 2) <i>Loam</i> |
| 3) Reinforced concrete fastening plates | 3) <i>Plaques d'arrimage de béton armé</i> |
| 4) Rubble layer | 4) <i>Couche de blocailles</i> |
| 5) Sand layer | 5) <i>Couche de sable</i> |
| b) Refrigerating system for spillway of Oyur-Yurege dam | b) <i>Système frigorifique, déversoir du barrage d'Oyur-Yurege</i> |
| 1) Injecting collector | 1) <i>Collecteur d'injection</i> |
| 2) Exhaust collector | 2) <i>Collecteur d'échappement</i> |
| 3) Connecting inserts | 3) <i>Connexions</i> |
| 4) Refrigerating column | 4) <i>Colonne réfrigérante</i> |
| 5) Impermeable concrete wall | 5) <i>Mur de béton imperméable</i> |
| 6) Recess for storing columns | 6) <i>Niche de stockage des colonnes</i> |
| c) Aerial refrigerating system for spillway of Sitikanskaya dam | c) <i>Système frigorifique à l'air, déversoir du barrage de Sitikanskaïa</i> |
| 1) Refrigerating column | 1) <i>Colonne réfrigérante</i> |
| 2) Injecting collector | 2) <i>Collecteur d'injection</i> |
| 3) Discharge collector | 3) <i>Collecteur d'échappement</i> |
| 4) Hatch for repair of columns | 4) <i>Puits d'accès pour la réparation des colonnes</i> |
| 5) Impermeable concrete wall | 5) <i>Mur de béton imperméable</i> |
| 6) Dam body | 6) <i>Corps du barrage</i> |
| 7) Spillway structure | 7) <i>Structure du déversoir</i> |
| d) Liquid refrigerating system for spillway of Irelyakhskaya dam | d) <i>Système frigorifique à liquide, déversoir du barrage d'Irelyakhskaïa</i> |
| 1) Spillway ogee | 1) <i>Doucine du déversoir</i> |
| 2) Aerial cavity of heat exchanger | 2) <i>Réservoir d'air de l'échangeur de chaleur</i> |
| 3) Refrigerating column | 3) <i>Colonne réfrigérante</i> |
| 4) Impermeable concrete wall | 4) <i>Mur de béton imperméable</i> |
| 5) Seasonal soil thawing boundary | 5) <i>Limite de dégel saisonnier du sol</i> |



a)



b)



c)

Fig. 9

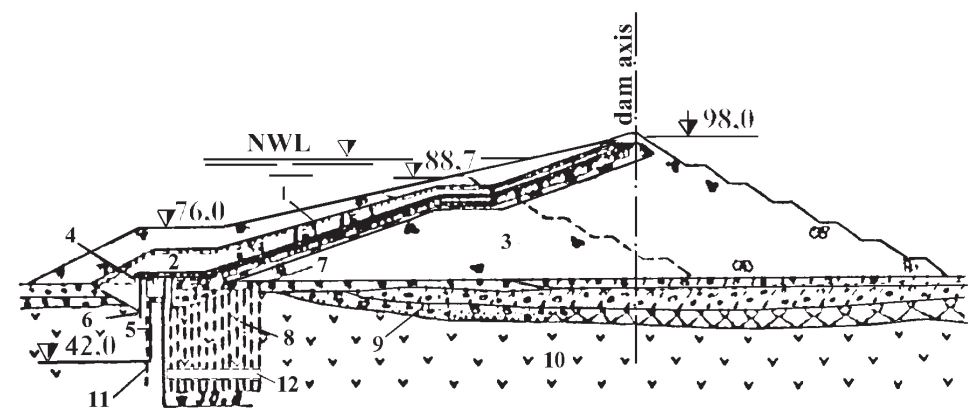
Temperature distribution in dam body and foundation
Répartition des températures dans le corps et les fondations du barrage

Fig. 9

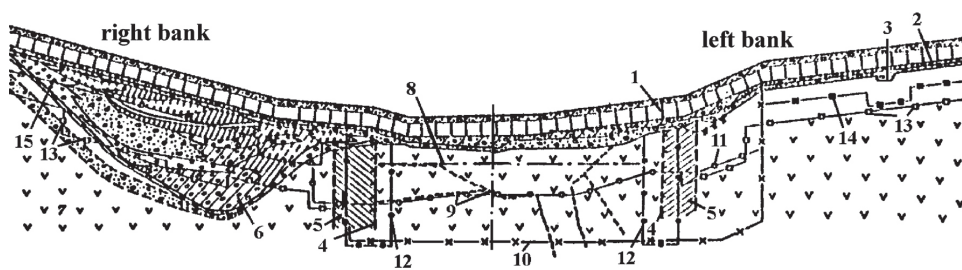
Temperature distribution in dam body and foundation

Répartition des températures dans le corps et les fondations du barrage

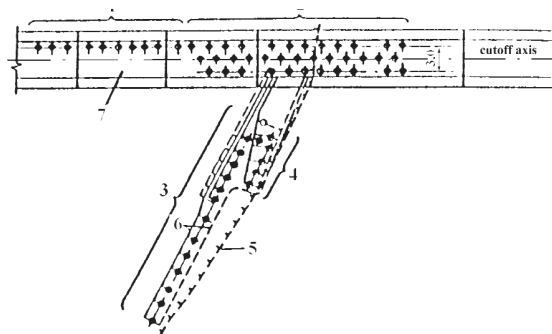
- | | |
|---|---|
| a) Viluiskaya HPP-I, II | a) CH de Viluiskaïa-I, II |
| b) Ust-Khantaiskaya HPP | b) CH d'Ust-Khantaïskaïa |
| c) Kolymkaya HPP | c) CH de Kolymkaïa |
| 1) Temperature sensors in downstream shell | 1) <i>Capteurs de température dans le massif de recharge aval</i> |
| 2) Temperature sensors in dam core | 2) <i>Capteurs de température dans le noyau du barrage</i> |
| 3) Temperature sensors in foundation boreholes
(other symbols see Fig. 3, 4, 11) | 3) <i>Capteurs de température dans les trous de mine des fondations (voir les autres symboles dans les Fig. 3, 4, 11)</i> |



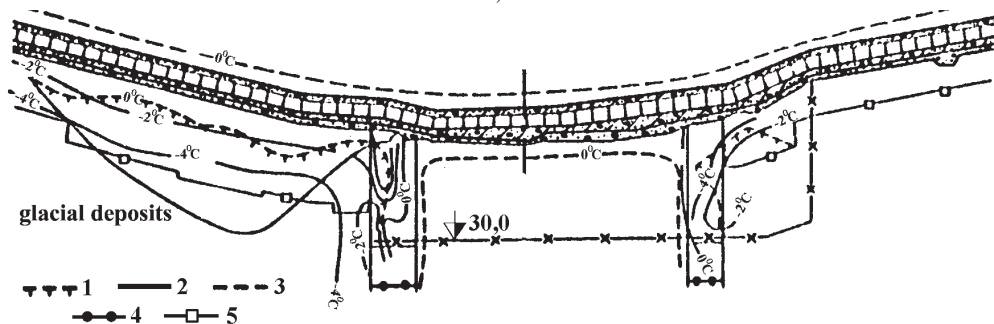
a)



b)



c)



d)

Fig. 10

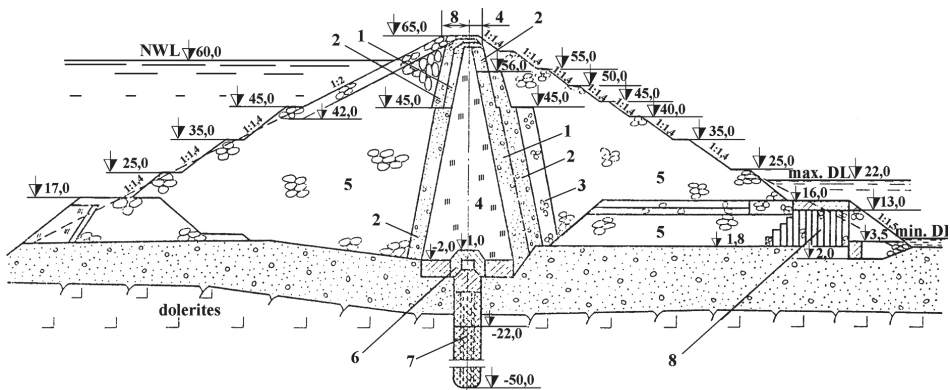
Tailings dam constructed by using two types of construction
Barrage de résidus miniers de deux types de construction

Fig. 10

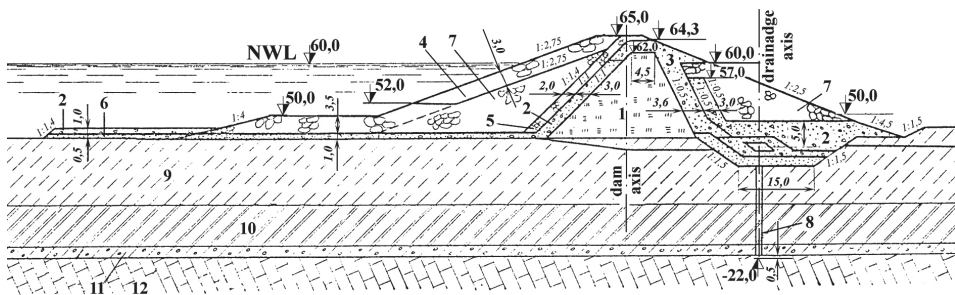
Tailings dam constructed by using two types of construction

Barrage de résidus miniers de deux types de construction

- | | |
|---|--|
| a) Dam cross section | a) <i>Section transversale du barrage</i> |
| 1) Polyethylene membrane | 1) <i>Membrane de polyéthylène</i> |
| 2) Clayey loam | 2) <i>Loam argileux</i> |
| 3) Rockfill | 3) <i>Enrochement</i> |
| 4) Inspection gallery | 4) <i>Galerie d'inspection</i> |
| 5) In depth grout curtain | 5) <i>Rideau d'injections en profondeur</i> |
| 6) Abutting grouting | 6) <i>Zone d'injection de coulis sur la culée</i> |
| 7) Cutoff trench | 7) <i>Tranchée parafouille</i> |
| 8) Refrigerating holes | 8) <i>Trous de réfrigération</i> |
| 9) Bed alluvials | 9) <i>Matières alluviales du lit</i> |
| 10) Basalts | 10) <i>Basaltes</i> |
| 11) Holes of refrigerating system in bank abutments | 11) <i>Trous de réfrigération dans les culées des rives</i> |
| 12) Refrigerating system along bed talik boundaries | 12) <i>Système frigorifique le long des limites du talik du lit</i> |
| b) Longitudinal section along dam cutoff axis | b) <i>Section longitudinale le long de l'axe du rideau d'étanchéité du barrage</i> |
| 1) Reinforced concrete gallery | 1) <i>Galerie de béton armé</i> |
| 2) Grouting platform | 2) <i>Plateforme d'injection de coulis</i> |
| 3) Keytrench bottom | 3) <i>Fond de la tranchée parafouille</i> |
| 4) Talik boundary | 4) <i>Limite du talik</i> |
| 5) « Slacking » permafrost zones | 5) <i>Zones de pergélisol ramollissantes</i> |
| 6) Glacial deposits | 6) <i>Dépôts glaciaires</i> |
| 7) Basalts | 7) <i>Basaltes</i> |
| 8) Groundwater level during winter low-water period | 8) <i>Niveau des eaux souterraines pendant la période de basses eaux d'hiver</i> |
| 9) Boundaries of various permeability rock | 9) <i>Limites des roches de diverses perméabilités</i> |
| 10) Lower boundary of grout curtain | 10) <i>Limite inférieure du rideau d'injections</i> |
| 11) Lower boundary of interface grouting | 11) <i>Limite inférieure de l'interface de l'injection de coulis</i> |
| 12) Permafrost grouting abutment | 12) <i>Zone d'injection de coulis de la culée dans le pergélisol</i> |
| 13) Bank refrigerating systems | 13) <i>Systèmes frigorifiques du rivage</i> |
| 14) Contact grouting outline | 14) <i>Tracé de la zone de contact avec l'injection de coulis</i> |
| 15) Filling grouting | 15) <i>Matières de remplissage - injection de coulis</i> |
| c) Freezing-grouting interface in the right bank | c) <i>Interface gel-injections sur la rive droite</i> |
| 1) Refrigerating holes of right-bank stabilizing system (hole spacing 1.75 m) | 1) <i>Trous de réfrigération du système de stabilisation de la rive droite (espacement des trous : 1,75 m)</i> |
| 2) Refrigerating holes of freezing-grouting interface (hole facing 1.75 m) | 2) <i>Trous de réfrigération de l'interface sol gelé-injections (espacement des trous : 1,75 m)</i> |
| 3) Refrigerating holes along bed talik boundaries (13 holes with 1.5-2 m spacing) | 3) <i>Trous de réfrigération le long des limites du talik du lit (13 trous espacés de 1,5-2 m)</i> |
| 4) Refrigerating holes along bed talik boundaries (5 holes of 1.5 m spacing) | 4) <i>Trous de réfrigération le long des limites du talik du lit (5 trous espacés de 1,5 m)</i> |
| 5) Frozen soil boundaries | 5) <i>Limites du sol gelé</i> |
| 6) 325 mm diameter air lines | 6) <i>Diamètre des canalisations d'air : 325 mm</i> |
| 7) Inspection gallery | 7) <i>Galerie d'inspection</i> |
| d) Temperature in dam foundation | d) <i>Température dans les fondations du barrage</i> |
| 1) Position of zero isotherm during construction period | 1) <i>Position de l'isotherme de zéro pendant la période de construction</i> |
| 2) 0°C, -2°C, -4°C isotherms after 1st refrigerating cycle | 2) <i>Isothermes 0°C, -2°C, -4°C après le premier cycle de réfrigération</i> |
| 3) Position of zero isotherm during injection of cold air into inspection gallery | 3) <i>Position de l'isotherme de zéro pendant l'injection d'air froid dans la galerie d'inspection</i> |
| 4) Freezing-grouting interface | 4) <i>Interface sol gelé-injections</i> |
| 5) Bank refrigerating systems | 5) <i>Systèmes frigorifiques des rives</i> |



a)



b)

Fig. 11
 Dam of Ust-Khantaiskaya HPP
 Barrage de la CH d'Ust-Khantaiskaïa

Fig. 11

Dam of Ust-Khantaiskaya HPP
Barrage de la CH d'Ust-Khantaiskaïa

- | | |
|---|---|
| a) Run-of-river dam | a) <i>Barrage au fil de l'eau</i> |
| 1) 1-st layer of filter | 1) <i>Première couche du filtre</i> |
| 2) 2-nd layer of filter | 2) <i>Deuxième couche du filtre</i> |
| 3) 3-rd layer of filter | 3) <i>Troisième couche de filtre</i> |
| 4) Moraine loam core | 4) <i>Noyau de moraine et de loam</i> |
| 5) Rockfill | 5) <i>Enrochement</i> |
| 6) Grouting gallery | 6) <i>Galerie d'injection</i> |
| 7) Grout curtain | 7) <i>Rideau d'injections</i> |
| 8) Dam strengthening during flood discharge | 8) <i>Renforcement du barrage pour faire face aux inondations</i> |
| b) Right-bank dam | b) <i>Barrage de la rive droite</i> |
| 1) Moraine loam core | 1) <i>Noyau de moraine et de loam</i> |
| 2) Filter, sandy-gravel | 2) <i>Filtre, gravier sableux</i> |
| 3) Filter, gravelly-pebble | 3) <i>Filtre, galets et gravier</i> |
| 4) Rockfill | 4) <i>Enrochement</i> |
| 5) Gravelly-pebble | 5) <i>Galets et gravier</i> |
| 6) Sand | 6) <i>Sable</i> |
| 7) Rockfill | 7) <i>Enrochement</i> |
| 8) Drain holes | 8) <i>Trous de drainage</i> |
| 9) Glacial-lacustrine loams | 9) <i>Loams glaciaux et lacustres</i> |
| 10) Varved clays | 10) <i>Argiles à varves</i> |
| 11) Moraine | 11) <i>Moraine</i> |
| 12) Limestone | 12) <i>Calcaire</i> |

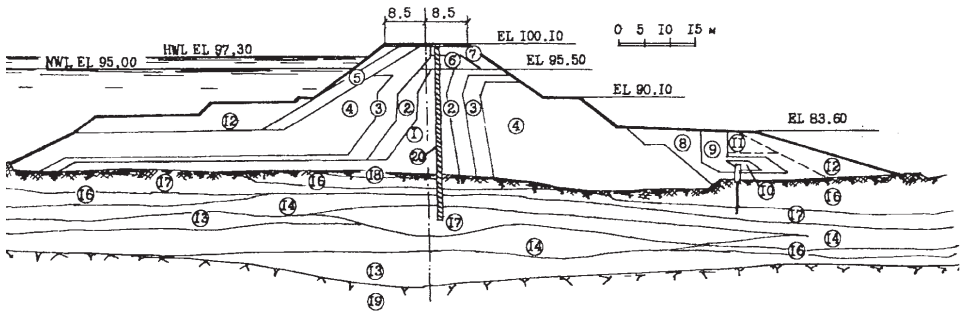


Fig. 12

Dam of Kureiskaya HPP

Barrage de la CH de Kureiskaïa

River channel section on compressible foundation
(sta 7+20)

Section du lit du cours d'eau reposant sur des
fondations en compression (station 7+20)

- 1) Clay core
- 2) Sandy-gravel filter zone
- 3) Gravel transition zone
(10-200 mm diameter)
- 4) Quarried rockfill ($d_{50\%} > 200$ mm)
- 5) Riprap
- 6) Sandy gravel (up to 10 mm diameter)
- 7) Gravel (40-80 mm diameter)
- 8) Sand
- 9) Gravel (4-20 mm diameter)
- 10) Drainage zone (20-50 mm diameter gravel)
- 11) Soil from river bed
- 12) Random material
- 13) Loam ($K_f = 0.03$ m/day)
- 14) Gravel ($K_f = 5-30$ m/day)
- 15) Pebble ($K_f = 30-50$ m/day)
- 16) Sandy loam ($K_f = 0.3-0.5$ m/day)
- 17) Loam ($K_f = 0.05$ m/day)
- 18) Sand ($K_f = 3.0$ m/day)
- 19) Dolerite
- 20) Diaphragm wall

- 1) Noyau d'argile
- 2) Zone de filtre de gravier sableux
- 3) Zone de transition du gravier (diamètre :
10-200 mm)
- 4) Enrochement de carrière ($d_{50\%} > 200$ mm)
- 5) Perré
- 6) Gravier sableux (diamètre max. : 10 mm)
- 7) Gravier (diamètre : 40-80 mm)
- 8) Sable
- 9) Gravier (diamètre : 4-20 mm)
- 10) Zone de drainage (diamètre du gravier :
20-50 mm)
- 11) Matériaux terreux provenant du lit du cours
d'eau
- 12) Matériaux divers
- 13) Loam ($K_f : 0,03$ m/jour)
- 14) Gravier ($K_f : 5-30$ m/jour)
- 15) Galets ($K_f : 30-50$ m/jour)
- 16) Loam sableux ($K_f : 0,3-0,5$ m/jour)
- 17) Loam ($K_f : 0,05$ m/jour)
- 18) Sable ($K_f : 3,0$ m/jour)
- 19) Dolerite
- 20) Paroi du diaphragme

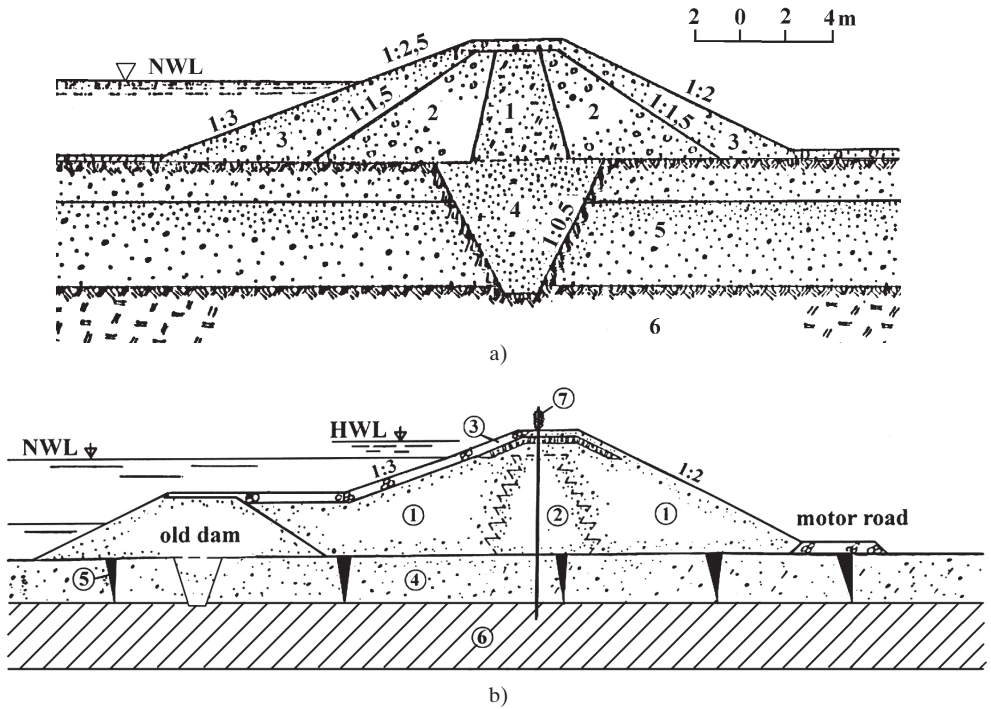


Fig. 13

Anadyrskaya dam

Barrage d'Anadyrskaja

a) Old dam cross section

- 1) Core from fine sand and sandy loam
- 2) Shells from gravelly sand and stones
- 3) Surcharge
- 4) Fine sand
- 5) Gravel-pebble soils
- 6) Loams

b) New dam cross section.

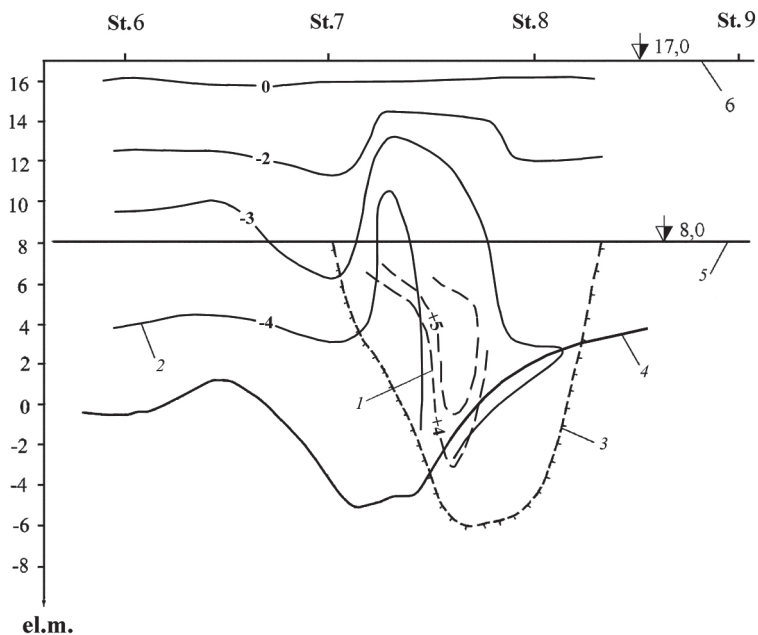
- 1) Shells from gravel-rubble soils with up to 40% loam
- 2) Dam core of loam with up to 40% rubble and gravel of andesite basalts
- 3) Surcharge from coarse rubble of andesite-basalts
- 4) Alluvial and deluvial soils, ice-rich, with polygonal-veined ice
- 5) Polygonal-veined ice
- 6) Marine loams and clays
- 7) Steam-liquid refrigerating system along dam axis

a) Section transversale de l'ancien barrage

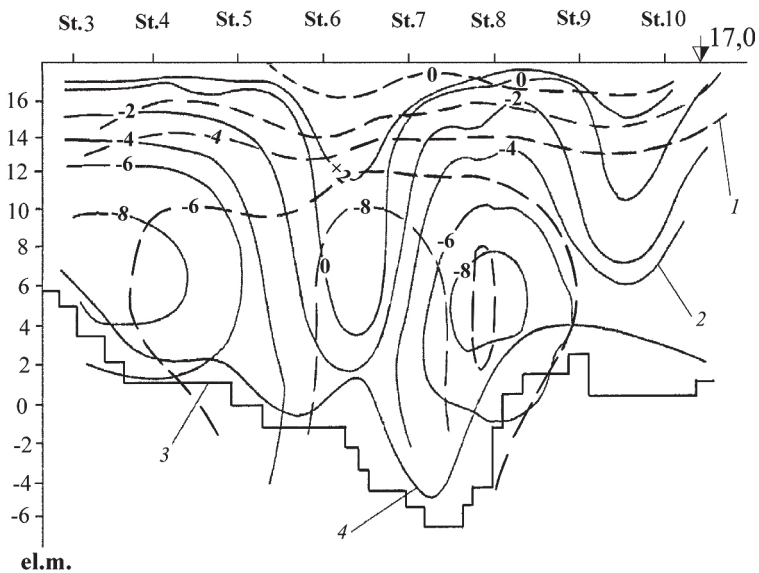
- 1) Noyau de sable fin et de loam sableux
- 2) Massifs de recharge de sable graveleux et de roches
- 3) Surcharge
- 4) Sable fin
- 5) Sols de gravier et de galets
- 6) Loams

b) Section transversale du nouveau barrage

- 1) Massifs de recharge de sols de gravier et de blocailles, contenant jusqu'à 40 % de loam
- 2) Noyau du barrage de loam contenant jusqu'à 40 % de blocailles et de gravier de basaltes andésitiques
- 3) Surcharge de blocailles grossières de basaltes andésitiques
- 4) Sols alluviaux et diluviens, riches en glace, avec de la glace polygonale et veinée
- 5) Glace polygonale et veinée
- 6) Loams marins et argiles
- 7) Système frigorifique vapeur-liquide le long de l'axe du barrage



a)



b)

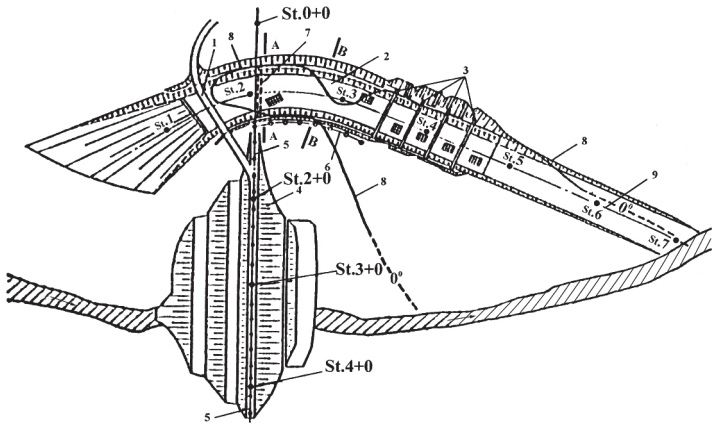
Fig. 14

Temperature dynamics in the body and foundation on dam axis of Anadyrskaya dam
*Caractéristiques dynamiques de la température dans le corps et les fondations,
sur l'axe du barrage d'Anadyrskaja*

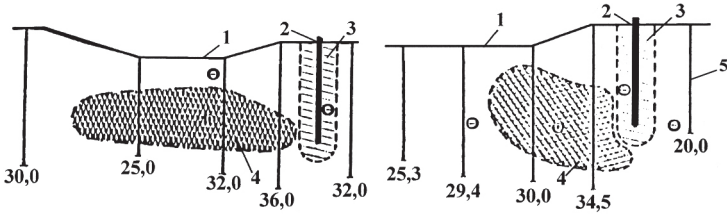
Fig. 14

Temperature dynamics in the body and foundation on dam axis of Anadyrskaya dam
*Caractéristiques dynamiques de la température dans le corps et les fondations,
sur l'axe du barrage d'Anadyrskaja*

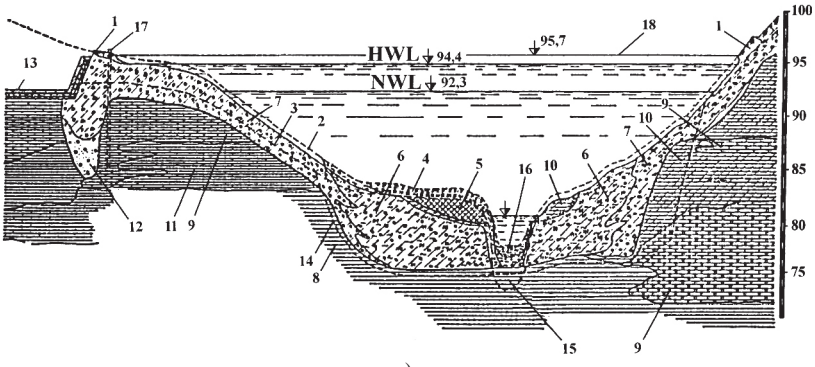
- | | |
|--------------------------------------|--|
| a) | a) |
| 1) Isotherms as per October, 1979 | 1) <i>Isothermes en date d'octobre, 1979</i> |
| 2) Isotherms as per October, 1983 | 2) <i>Isothermes en date d'octobre, 1983</i> |
| 3) Talik zone boundary | 3) <i>Limite de la zone de talik</i> |
| 4) Loam roof | 4) <i>Couche supérieure du loam</i> |
| 5) Crest elevation of unfinished dam | 5) <i>Hauteur de la crête du barrage en construction</i> |
| 6) Dam crest elevation | 6) <i>Hauteur de la crête du barrage</i> |
| b) | b) |
| 1) Isotherms as per October, 1989 | 1) <i>Isothermes en date d'octobre, 1989</i> |
| 2) Isotherm as per October, 1998 | 2) <i>Isotherme en date d'octobre, 1998</i> |
| 3) Frozen shield foundation outline | 3) <i>Tracé des fondations du bouclier de glace</i> |
| 4) Loam roof | 4) <i>Couche supérieure du loam</i> |



a)



b)

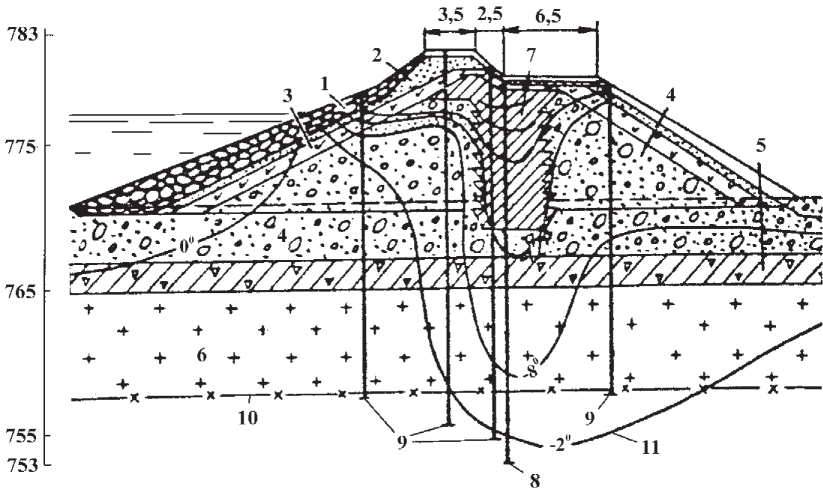


c)

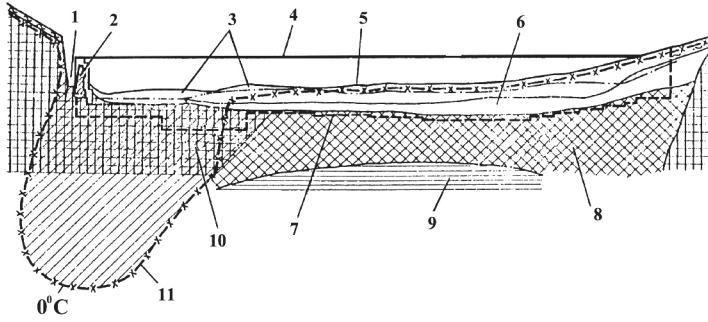
Fig. 15
 Dam of permanent reservoir on Irelyakh river
 Barrage du réservoir permanent sur la rivière Irelyakh
 HWL = NEE

Fig. 15
 Dam of permanent reservoir on Irelyakh river
Barrage du réservoir permanent sur la rivière Irelyakh
 HWL = NEE

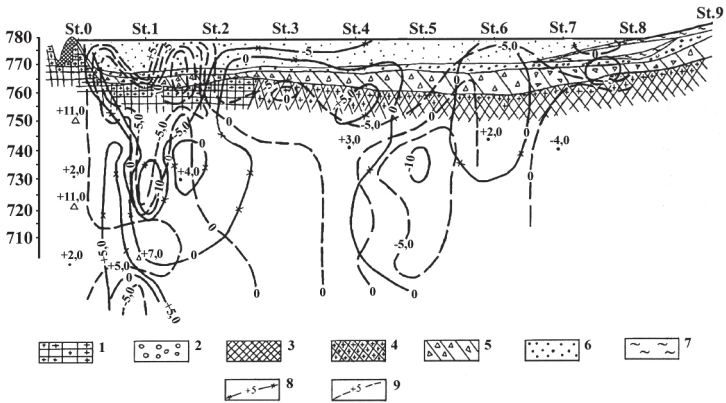
a) Plan view	a) <i>Vue en plan</i>
1) Bridge	1) <i>Pont</i>
2) Spillway channel	2) <i>Déversoir</i>
3) Drop walls	3) <i>Murs de chute</i>
4) Dam	4) <i>Barrage</i>
5) Dam frozen shield	5) <i>Bouclier de glace du barrage</i>
6) Frozen shield along the channel edge	6) <i>Bouclier de glace le long des bords du canal</i>
7) Frozen shield beneath the channel	7) <i>Bouclier de glace sous le canal</i>
8) Shape of thawed zone	8) <i>Forme de la zone dégelée</i>
9) Outlet channel	9) <i>Canal d'évacuation</i>
b) Temperature in the foundation of spillway channel	b) <i>Température dans les fondations du déversoir</i>
1) Channel bed	1) <i>Lit du canal</i>
2) Refrigerating columns	2) <i>Colonnes réfrigérantes</i>
3) Frozen shield along the right edge of the channel	3) <i>Bouclier de glace le long du rebord droit du canal</i>
4) Talik	4) <i>Talik</i>
5) Well and its depth	5) <i>Les puits et leur profondeur</i>
c) Geological section of dam foundation	c) <i>Section géologique des fondations du barrage</i>
1) Soil vegetation layer	1) <i>Couche de végétation du sol</i>
2) Natural surface	2) <i>Surface naturelle</i>
3) Seasonal thawing boundary	3) <i>Limite saisonnière de dégel</i>
4) Peat excavation	4) <i>Zone d'extraction de la tourbe</i>
5) Mud excavation	5) <i>Zone d'extraction de la boue</i>
6) Silty loams with 60% ice content.	6) <i>Loams silteux d'une teneur en glace de 60 %</i>
7) Loams with gravel and rubbles of bedrock, ice content 20-60 %	7) <i>Loams avec gravier et blocailles de substrat rocheux, teneur en glace de 20-60 %</i>
8) Dense clays	8) <i>Argiles denses</i>
9) Fissured dolomites	9) <i>Dolomites fissurées</i>
10) Fissured marls	10) <i>Marnes fissurées</i>
11) Thin platy limestones	11) <i>Calcaires minces en plaques</i>
12) Old river channel, filled with pebbles and gravel	12) <i>Ancien lit du cours d'eau, rempli de galets et de gravier</i>
13) Spillway channel	13) <i>Déversoir</i>
14) Shape of excavation bottom for dam cutoff	14) <i>Forme de l'excavation, au fond du rideau d'étanchéité du barrage</i>
15) Bed talik	15) <i>Talik du lit</i>
16) Removal of alluvial deposits in the river bed	16) <i>Élimination des dépôts dans le lit du cours d'eau</i>
17) Frozen shield along the channel edge	17) <i>Bouclier de glace le long du rebord du canal</i>
18) Crest of dam	18) <i>Crête du barrage</i>



a)



b)

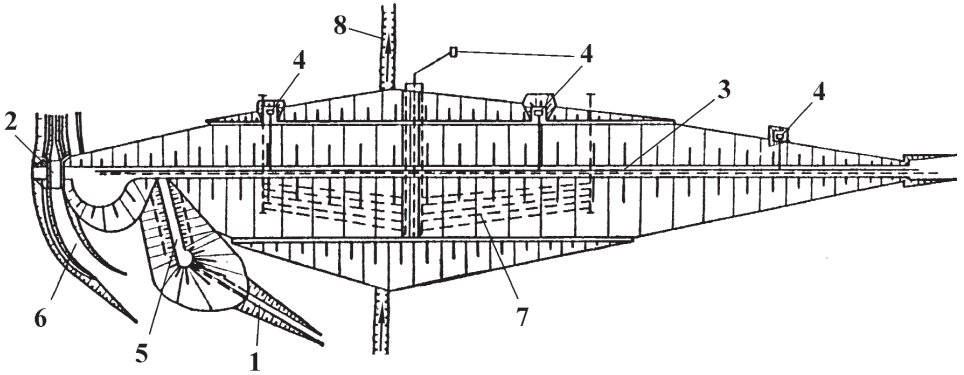


c)

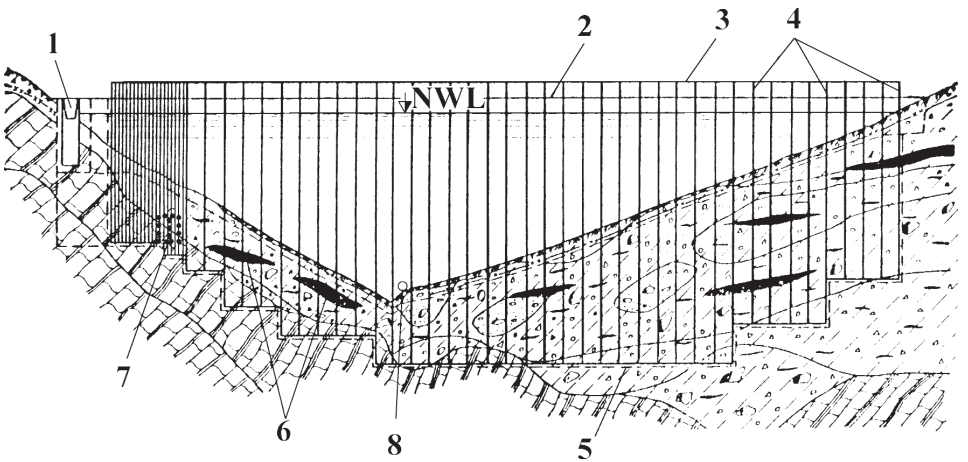
Fig. 16
Dam on Myaundzha river
Barrage de la rivière Myaundja

Fig. 16
 Dam on Myaundzha river
Barrage de la rivière Myaundja

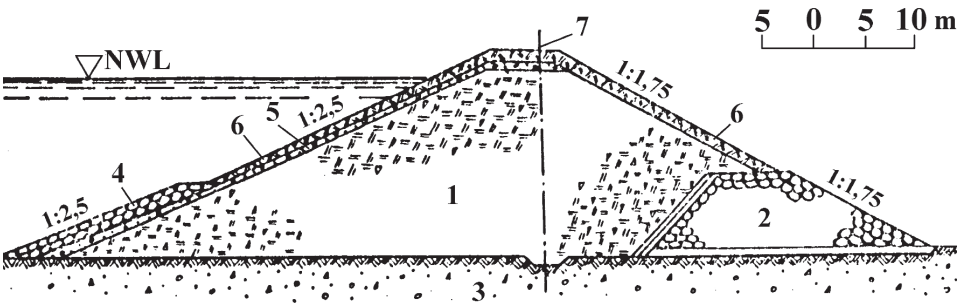
- | | |
|--|--|
| a) Dam cross section | <i>a) Section transversale du barrage</i> |
| 1) Stone face | 1) <i>Surface de roche</i> |
| 2) Sand | 2) <i>Sable</i> |
| 3) Peat | 3) <i>Tourbe</i> |
| 4) Gravel sand with pebbles | 4) <i>Gravier-sable avec galets</i> |
| 5) Stony loam | 5) <i>Loam pierreux</i> |
| 6) Weathered fissured andesite-basalts | 6) <i>Basaltes andésitiques fissurés et altérés</i> |
| 7) Dam core stony loam | 7) <i>Loam pierreux du noyau du barrage</i> |
| 8) Refrigerating column | 8) <i>Colonne réfrigérante</i> |
| 9) Geothermal boreholes | 9) <i>Trous forés géothermiques</i> |
| 10) Lower boundary of former bed talik | 10) <i>Limite inférieure de l'ancienne zone de talik du lit</i> |
| 11) Isotherm distribution over the cross section as per January 30, 1957 | 11) <i>Répartition des isothermes au-dessus de la section transversale, en date du 30 janvier 1957</i> |
| b) Dam foundation thawing | <i>b) Dégel des fondations du barrage</i> |
| 1) Spillway channel | 1) <i>Déversoir</i> |
| 2) Spillway structure | 2) <i>Structure du déversoir</i> |
| 3) Deluvium | 3) <i>Matières déluvienne</i> |
| 4) Dam crest | 4) <i>Crête du barrage</i> |
| 5) Natural earth surface | 5) <i>Surface en terre naturelle</i> |
| 6) Alluvium | 6) <i>Matières alluviales</i> |
| 7) Deepening boundary of refrigerating columns | 7) <i>Limite de profondeur des colonnes réfrigérantes</i> |
| 8) Andesites | 8) <i>Andésites</i> |
| 9) Argillites | 9) <i>Argillites</i> |
| 10) Andesite-basalts | 10) <i>Basaltes andésitiques</i> |
| 11) Foundation thawing boundary | 11) <i>Limite de dégel des fondations</i> |
| c) Engineering-geocryological section along dam axis | <i>c) Section technique-géocryologique le long de l'axe du barrage</i> |
| 1) Andesite-basalts | 1) <i>Basaltes andésitiques</i> |
| 2) Pebbles and gravel | 2) <i>Galets et gravier</i> |
| 3) Concrete | 3) <i>Béton</i> |
| 4) Andesites | 4) <i>Andésites</i> |
| 5) Loam with stones rock debris and blocks | 5) <i>Loam avec débris et blocs de roches</i> |
| 6) Earth dam body | 6) <i>Corps du barrage de terre</i> |
| 7) Ice-rich silt | 7) <i>Silt riche en glace</i> |
| 8) Temperature distribution per February 1990 | 8) <i>Répartition des températures en février 1990</i> |
| 9) Temperature distribution per August 1989 | 9) <i>Répartition des températures en août 1989</i> |



a)



b)



c)

Fig. 17
 Dam on Pevek creek
 Barrage du ruisseau Pevek

Fig. 17

Dam on Pevek creek

Barrage du ruisseau Pevek

- | | |
|---|--|
| a) Plan view | a) <i>Vue en plan</i> |
| 1) Approach channel of bottom intake/outlet | 1) <i>Canal d'approche de la prise d'eau/exutoire du fond</i> |
| 2) Spillway structure | 2) <i>Structure de l'évacuateur</i> |
| 3) Frozen shield | 3) <i>Bouclier de glace</i> |
| 4) Fans | 4) <i>Ventilateurs</i> |
| 5) Head of water intake | 5) <i>Embouchure de la prise d'eau</i> |
| 6) Approach section of spillway channel | 6) <i>Section de l'entrée du déversoir</i> |
| 7) Pipes of refrigerating system | 7) <i>Canalisation du système frigorifique</i> |
| 8) Creek channel | 8) <i>Canal du ruisseau</i> |
| b) Longitudinal section along dam axis | b) <i>Section longitudinale le long de l'axe du barrage</i> |
| 1) Spillway | 1) <i>Évacuateur de crues</i> |
| 2) Dam crest | 2) <i>Crête du barrage</i> |
| 3) Header | 3) <i>Charge de pression</i> |
| 4) Refrigerating columns | 4) <i>Colonnes réfrigérantes</i> |
| 5) Frozen shield deepening boundary | 5) <i>Limite de profondeur du bouclier de glace</i> |
| 6) Ice lenses | 6) <i>Lentilles de glace</i> |
| 7) Trenches for water intake conduits | 7) <i>Tranchées pour les conduits de la prise d'eau</i> |
| 8) Pipe for discharge during dam construction | 8) <i>Canalisation d'évacuation pendant la construction du barrage</i> |
| c) Dam cross section | c) <i>Section transversale du barrage</i> |
| 1) Sandy loam with rubbles | 1) <i>Loam sableux avec blocailles</i> |
| 2) Rockfill berm | 2) <i>Berme d'enrochement</i> |
| 3) Rubbles with pebbles | 3) <i>Blocailles à galets</i> |
| 4) Stone protection | 4) <i>Couche de protection en pierres</i> |
| 5) Pebble layer | 5) <i>Couche de galets</i> |
| 6) Moss or peat | 6) <i>Mousse ou tourbe</i> |
| 7) Frozen shield axis | 7) <i>Axe du bouclier de glace</i> |

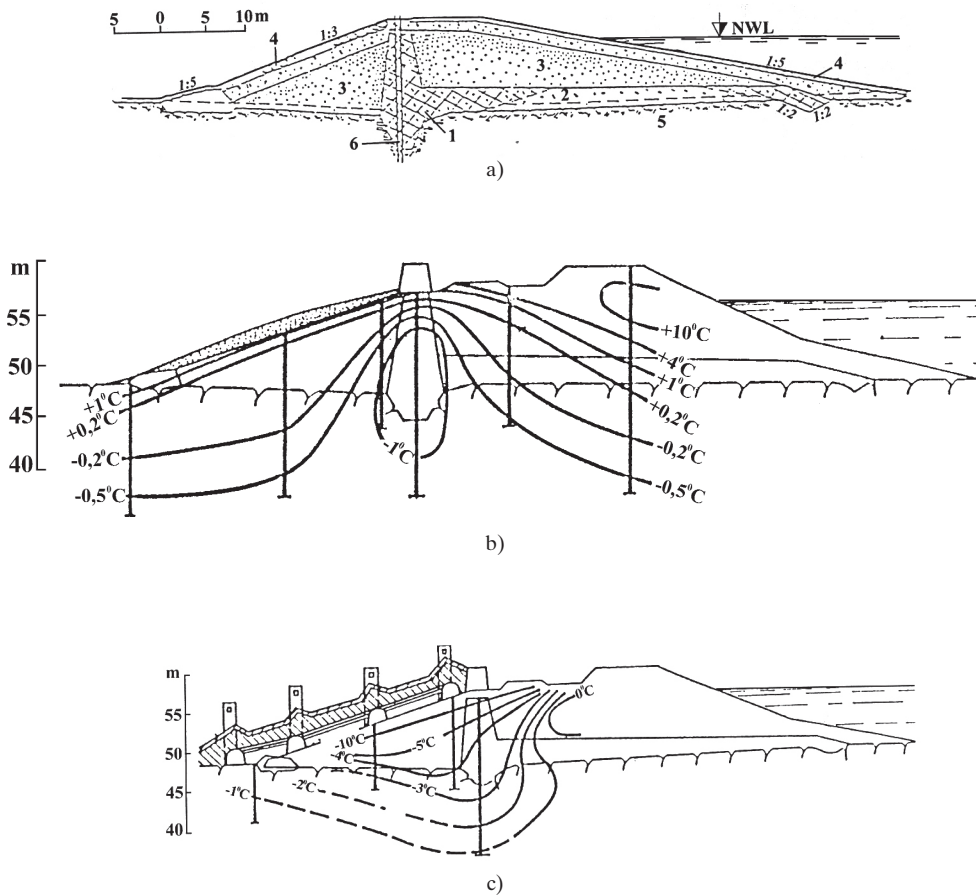
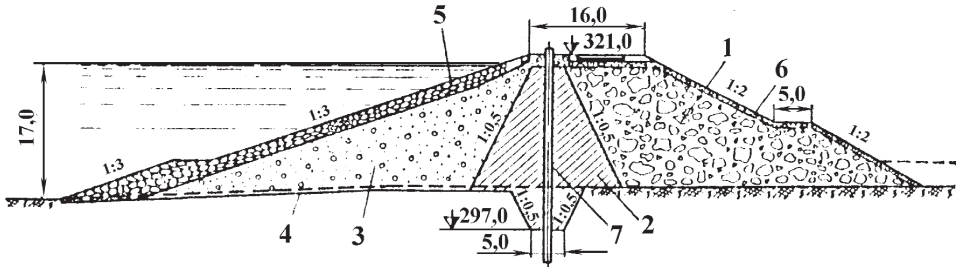
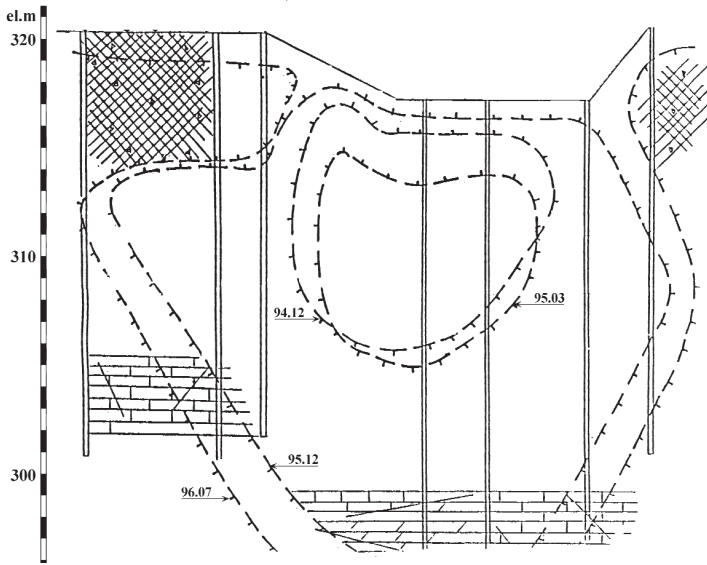


Fig. 18
 Dam on Dolgaya River
 Barrage de la rivière Dolgaya

- | | |
|--|---|
| a) Cross section of the dam | a) Section transversale du barrage |
| 1) Clay concrete core | 1) Noyau d'argile et de béton |
| 2) Loamy inner blanket | 2) Couche intérieure loameuse |
| 3) Shells of fine sand | 3) Massifs de recharge de sable fin |
| 4) Pavement over a layer of sand and moss | 4) Revêtement au-dessus d'une couche de sable et de mousse |
| 5) Moraine sandy loams | 5) Loams sableux de la moraine |
| 6) Frozen shield.. | 6) Bouclier de glace |
| b) Dam temperature regime prior to arrangement of refrigerating system on the downstream slope | b) Régime de température du barrage avant la mise en place du système frigorifique sur le massif aval |
| c) Dam temperature regime after arrangement of refrigerating system on the downstream slope | c) Régime de température du barrage après la mise en place de système frigorifique sur le massif aval |



a)



b)

Fig. 19
Dam on Sytykan River
Barrage de la rivière Sytykan

a) Cross section of the dam

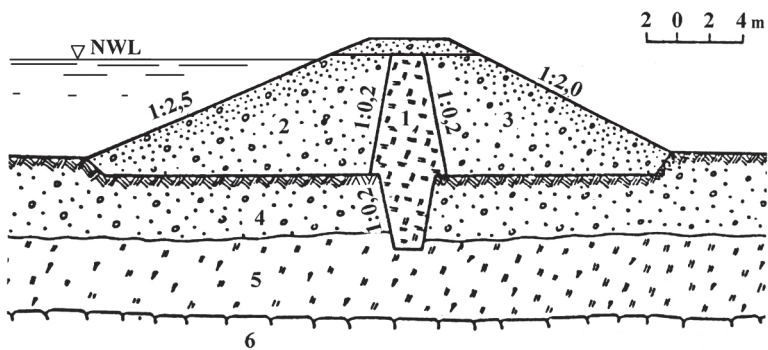
- 1) Rockfill
- 2) Core of gravelly loams
- 3) Sandy-gravel
- 4) Foundation stripping
- 5) Riprap
- 6) Heat insulation fine stones
- 7) Refrigerating columns

b) Permafrost thawing dynamics at the spillway channel section (December 1994- July 1996)

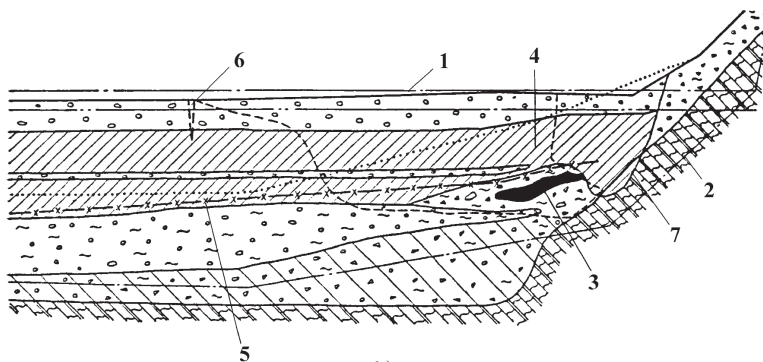
a) Section transversale du barrage

- 1) *Enrochement*
- 2) *Noyau de loams graveleux*
- 3) *Gravier sableux*
- 4) *Zone découpée des fondations*
- 5) *Perré*
- 6) *Matériaux isolants (petites roches)*
- 7) *Colonnes réfrigérantes*

b) *Caractéristiques dynamiques du dégel du pergélisol, section du déversoir (décembre 1994- juillet 1996)*



a)



b)

Fig. 20

Dam on Kadykchan Creek

Barrage du ruisseau Kadykchan

a) Cross section of the dam

- 1) Core and cutoff trench of gravelly loam
- 2) Sandy-gravel soils
- 3) Pebble-gravel soils
- 4) Alluvial deposits
- 5) Loams with rock debris
- 6) Clay shales

a) *Section transversale du barrage*

- 1) *Noyau et tranchée parafouille de loam graveleux*
- 2) *Sols de gravier sableux*
- 3) *Sols de galets et de gravier*
- 4) *Dépôts*
- 5) *Loams avec débris de roche*
- 6) *Argiles litées*

b) Right bank abutment of dam

- 1) Crest
- 2) Shape of key trench design
- 3) Ice lense
- 4) Scour in dam body
- 5) Permafrost roof
- 6) Fissure
- 7) True outline of core trench footing

b) *Appui en rive droite du barrage*

- 1) *Crête*
- 2) *Forme de la tranchée parafouille*
- 3) *Lentille de glace*
- 4) *Zone d'affouillement dans le corps du barrage*
- 5) *Partie supérieure du pergélisol*
- 6) *Fissure*
- 7) *Tracé réel de la semelle de la tranchée du noyau*

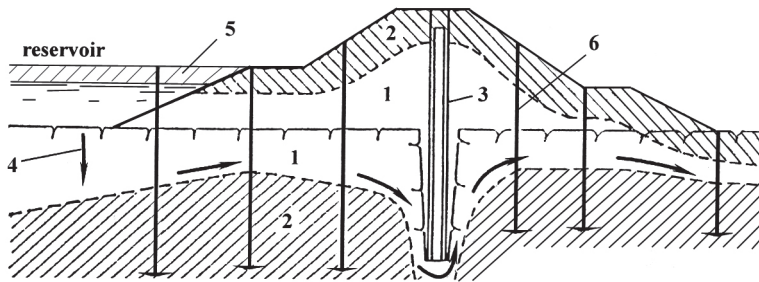


Fig. 21

Dam on Pravaya Magdagacha River

Barrage de la rivière Pravaya Magdagacha

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1) Thawed soils | 1) Sols dégelés |
| 2) Frozen soils | 2) Sols gelés |
| 3) Concrete diaphragm | 3) Diaphragme en béton |
| 4) Direction of seepage flow | 4) Direction de l'écoulement |
| 5) Ice | 5) Glace |
| 6) Wells for temperature observation | 6) Puits pour les mesures de température |

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : Janvier 2008
N° 24180
ISSN 0534-8293



INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS
COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES
151, boulevard Haussmann - 75008 Paris - France
Téléphone : (33) 01 53 75 16 52 - Fax : (33) 01 40 42 60 71
<http://www.icold-cigb.org/>