

WATERTIGHT GEOMEMBRANES FOR DAMS.

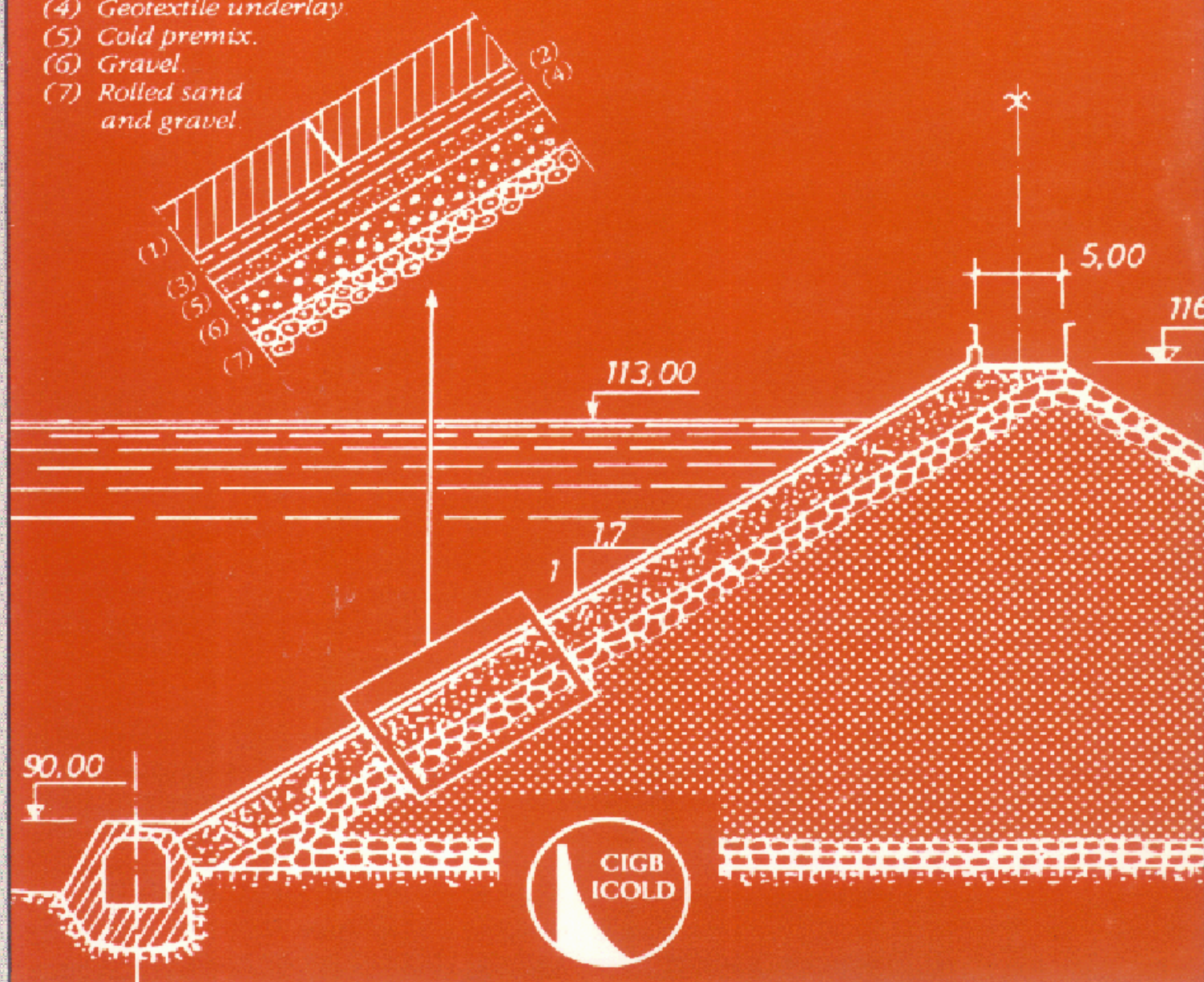
State of the art.

ÉTANCHÉITÉ DES BARRAGES PAR GÉOMEMBRANES.

Technique actuelle.

Bulletin 78

- (1) Concrete slabs.
- (2) Geotextile overlay.
- (3) Impervious geomembrane.
- (4) Geotextile underlay.
- (5) Cold premix.
- (6) Gravel.
- (7) Rolled sand and gravel.



1991

Revised edition of Bull. 38 prepared by R. Corda (France),
member of the Committee on Materials for Fill Dams,
with the assistance of G. Degoutte and C. Bernhard (CEMAGREF, France),
L. O. Timblin and W. R. Morrisson (USCOLD) and D. Cazzuffi (ENEL, Italy).
Original text in French; English translation by R. Chadwick.

The title of the previous edition was
“ Use of Thin Membranes on Fill Dams ”.

*Nouvelle édition du Bull. 38 préparée par R. Corda (France),
membre du Comité des Matériaux pour Barrages en Remblai,
avec la participation de G. Degoutte et C. Bernhard (CEMAGREF, France),
L. O. Timblin et W. R. Morrisson (USCOLD) et D. Cazzuffi (ENEL, Italie).
Texte original en français - Traduction en anglais par R. Chadwick.*

*Le titre de la première édition était
« Emploi des étanchéités minces sur les barrages en remblai ».*

WATERTIGHT GEOMEMBRANES FOR DAMS.

State of the art.

ÉTANCHÉITÉ DES BARRAGES PAR GÉOMEMBRANES.

Technique actuelle.

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 40 42 67 33 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

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

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

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

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

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

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

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

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

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

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. MATÉRIAUX, ESSAIS, VIEIL-
LISSEMENT
3. CONSTITUTION DU DISPOSI-
TIF D'ÉTANCHÉITÉ ET SOLLI-
CITATIONS AUXQUELLES IL
EST SOUMIS
4. RECOMMANDATIONS POUR
L'EMPLOI DES GÉOMEMBRA-
NES DANS LES BARRAGES EN
REMBLAI
5. AMÉLIORATION DE L'ÉTAN-
CHÉITÉ DES MASQUES EN BÉ-
TON PAR DES GÉOMEMBRA-
NES
6. UTILISATION DE GÉOMEM-
BRANES POUR RÉHABILITER
DES BARRAGES EN MAÇON-
NERIE OU EN BÉTON
7. CONCLUSIONS
8. RÉFÉRENCES

ANNEXES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. MATERIALS, TESTING,
AGEING
3. COMPOSITION OF, AND
LOADS APPLIED TO GEO-
MEMBRANE-BASED FACINGS
4. RECOMMENDATIONS ON USE
OF GEOMEMBRANES IN FILL
DAMS
5. GEOMEMBRANES FOR EN-
HANCED WATERTIGHTNESS
OF CONCRETE FACINGS
6. GEOMEMBRANES FOR THE
REHABILITATION OF CON-
CRETE AND MASONRY DAMS
7. CONCLUSIONS
8. REFERENCES

APPENDICES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	10
1. INTRODUCTION	12
2. MATÉRIAUX, ESSAIS, VIEILLISSEMENT	16
2.1. Les matériaux	16
2.2. Les essais de géomembranes	26
2.3. Le vieillissement des géomembranes	40
3. CONSTITUTION DU DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ ET SOLLICITATIONS AUXQUELLES IL EST SOUMIS	46
3.1. Constitution du dispositif d'étanchéité	46
3.2. Sollicitations mécaniques	48
3.3. Actions physico-chimiques et biologiques	54
3.4. Rôle d'une couche de protection vis-à-vis des sollicitations	56
4. RECOMMANDATIONS POUR L'EMPLOI DES GÉOMEMBRANES DANS LES BARRAGES EN REMBLAI	60
4.1. Conception du corps du barrage	60
4.2. Couche de forme	66
4.3. Couche support	68
4.4. La géomembrane	70
4.5. Couche de protection	80
4.6. Contrôle du dispositif d'étanchéité	84
5. AMÉLIORATION DE L'ÉTANCHÉITÉ DES MASQUES EN BÉTON PAR DES GÉOMEMBRANES	86
5.1. Techniques utilisées à ce jour	86
5.2. Recommandations pour la réparation de masques en béton	88
5.3. Perspectives nouvelles : les ouvrages neufs	90
6. UTILISATION DE GÉOMEMBRANES POUR RÉHABILITER DES BAR- RAGES EN MAÇONNERIE OU EN BÉTON	92
6.1. Présentation des techniques utilisées à ce jour	92
6.2. Perspectives nouvelles : les ouvrages neufs en béton compacté au rouleau	96
7. CONCLUSIONS	98
7.1. Les supports rigides	98
7.2. Géomembranes posées directement sur le remblai	98

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	11
1. INTRODUCTION	13
2. MATERIALS, TESTING, AGEING	17
2.1. Materials	17
2.2. Geomembrane Testing	27
2.3. Geomembrane Ageing	41
3. COMPOSITION OF, AND LOADS APPLIED TO GEOMEMBRANE-BASED FACINGS	47
3.1. Composition	47
3.2. Mechanical Loads	49
3.3. Physical, Chemical and Biological Attack	55
3.4. Purpose of Protective Layer	57
4. RECOMMENDATIONS ON USE OF GEOMEMBRANES IN FILL DAMS	61
4.1. Dam Design	61
4.2. Base Layer	67
4.3. Supporting Layer	69
4.4. Geomembrane	71
4.5. Protective Layer	81
4.6. Quality Control and Performance Monitoring	85
5. GEOMEMBRANES FOR ENHANCED WATERTIGHTNESS OF CONCRETE FACINGS	87
5.1. Techniques Used to Date	87
5.2. Recommendations on Repairs to Concrete Facings	89
5.3. Prospects for New Dams	91
6. GEOMEMBRANES FOR THE REHABILITATION OF CONCRETE AND MASONRY DAMS	93
6.1. Techniques Used to Date	93
6.2. Future Prospects for New Roller Compacted Concrete Dams	97
7. CONCLUSIONS	99
7.1. Rigid Backings	99
7.2. Direct Laying on Fill	99

7.3. Double étanchéité	98
7.4. Hauteur limite	100
7.5. Aspects économiques	100
8. RÉFÉRENCES	102
ANNEXES : 1. Terminologie	104
2. Normes d'essais	108
3. Liste des ouvrages recensés	114
4. Exemples d'utilisation : barrages	116
5. Exemples d'utilisation : réservoirs	122
6. Exemples d'utilisation : réhabilitation de barrages-poids	126
7. Schémas	129

7.3. Double Water Barrier	99
7.4. Maximum Height	101
7.5. Cost	101
8. REFERENCES	102
APPENDICES :	
1. Terminology	105
2. Selected geomembrane standard test methods	108
3. Dams incorporating geomembranes	114
4. Examples of applications : dams	117
5. Examples of applications : reservoirs	123
6. Examples of applications : rehabilitation of gravity dams	127
7. Sketches	129

LISTE DES FIGURES ET ANNEXES

- Fig. 1 . — Comportement des grandes familles de géomembranes.
Fig. 2 . — Méthodes de soudure thermique des géomembranes.
Fig. 3 . — Méthodes de soudure par solvant, collage et vulcanisation.
Fig. 4 . — Principe de l'essai de traction simple et courbe effort-déformation.
Fig. 5 . — Schéma de l'appareillage d'éclatométrie.
Fig. 6 . — Schéma de l'essai de poinçonnement.
Fig. 7 . — Essai de pelage.
Fig. 8 . — Éléments constitutifs de l'étanchéité.
Fig. 9 . — Exemples de raccordement à un ouvrage rigide.
Fig. 10. — Cas d'un parement amont avec risberme.
Fig. 11. — Barrages en terre : Simple drainage et double drainage.
Fig. 12. — Joint horizontal entre 2 panneaux.
Fig. 13. — Exemple d'ancrage en tête.
Fig. 14. — Exemple de géomembrane non ancrée en tête.
Fig. 15. — Ancrage de pied par une tranchée en terre.
Fig. 16. — Raccordement à un parafouille en béton.
Fig. 17. — Réhabilitation de barrages poids : Schéma des fixations - Coupe horizontale.
- Annexe 1. — Terminologie.
Annexe 2. — Normes d'essais.
Annexe 3. — Ouvrages recensés.
Annexe 4. — Exemples d'utilisation : barrages.
Annexe 5. — Exemples d'utilisation : réservoirs.
Annexe 6. — Exemples d'utilisation : réhabilitation de barrages poids.
Annexe 7. — Barrage de Contrada Sabetta - Détail du masque amont.
Barrage de Miel - Coupe transversale.
Barrage de Landstejn - Coupe transversale.
Barrage d'Odiel - Coupe type.
Barrage d'Odiel - Détail de la fixation.
Réservoir de la Coche - Détails du drainage.
Barrage de Nérès - Coupe transversale.
Barrage de Codole - Coupe type.
Barrage de Codole - Détail du dispositif d'étanchéité par géomembrane.
Barrage de Codole - Raccordement haut.
Barrage d'Isanlu - Coupe type.
Barrage d'Isanlu - Détail du dispositif d'étanchéité par géomembrane.
Barrage de Valence d'Albi - Coupe schématique.

LIST OF FIGURES AND APPENDICES

- Fig. 1 . — Properties of main geomembrane materials.
Fig. 2 . — Geomembrane thermal welding methods.
Fig. 3 . — Geomembrane solvent and adhesive seaming methods.
Fig. 4 . — Tensile Test and Stress Strain Curve.
Fig. 5 . — Burst Test Apparatus.
Fig. 6 . — Puncture Strength Test Apparatus.
Fig. 7 . — Peel Test.
Fig. 8 . — Watertight Facing System.
Fig. 9 . — Connection to Rigid Structures.
Fig. 10. — Method of Negotiating Berms on Dam Face.
Fig. 11. — Single and Double Drainage in Earth Dams.
Fig. 12. — Horizontal Seam Arrangement.
Fig. 13. — Typical Crest Anchorage.
Fig. 14. — Typical Details without Crest Anchorage.
Fig. 15. — Toe Anchor Trench.
Fig. 16. — Connection to Concrete Cut-Off.
Fig. 17. — Horizontal Sections through Steel Rib Fastening Systems.
- Appendix 1. — Terminology.
Appendix 2. — Selected geomembrane standard test methods.
Appendix 3. — Dams incorporating geomembranes.
Appendix 4. — Examples of Applications : dams.
Appendix 5. — Examples of applications : reservoirs.
Appendix 6. — Examples of applications : rehabilitation of gravity dams.
Appendix 7. — Contrada Sabetta dam - Detail of the upstream facing.
Miel Dam - Cross section.
Landstejn dam - Cross section.
Odiel dam - Cross section.
Odiel dam - Detail of fixing of the membrane.
La Coche dam - Details of drain.
Néris dam - Cross section.
Codole dam - Cross section.
Codole dam - Membrane facing detail.
Codole dam - Crest anchorage detail.
Isanlu dam - Typical section.
Isanlu dam - Geomembrane facing detail.
Cross section of the Valence d'Albi dam.

AVANT-PROPOS

La première édition de ce Bulletin fut publiée en 1981 en tant que Bulletin 38 (*). C'était un véritable guide technique documenté, précis et détaillé; on y analysait les différents types de membranes et leurs caractéristiques, les efforts théoriques et pratiques mis en jeu et on présentait les solutions à mettre en œuvre en donnant des exemples d'utilisation.

Durant la décennie écoulée, des matériaux nouveaux et plus performants sont devenus disponibles et l'expérience acquise s'est traduite par une meilleure compréhension de leurs conditions d'emploi et par des progrès dans l'ingénierie des barrages, si bien qu'on a pu les utiliser sur des barrages de plus en plus hauts.

L'utilisation des géomembranes fut étendue à de nouveaux domaines, par exemple, pour renforcer une autre forme d'étanchéité, réparer de vieux barrages-poids ou de vieux barrages en remblai dont le masque d'étanchéité était détérioré. Enfin, de nouvelles idées ont vu le jour concernant par exemple le drainage, la couche support ou la couche de protection; l'emploi des géomembranes est maintenant envisagé pour assurer l'étanchéité amont des barrages en béton compacté au rouleau.

Cette nouvelle édition du Bulletin 38 met à jour les données et recommandations de la première édition et traite des nouveautés qui sont apparues depuis dix ans.

Cette révision fut préparée par les Comités Nationaux des Grands Barrages de France et des États-Unis, avec la participation du Comité Italien. Qu'ils en soient vivement remerciés.

G. S. LAROCQUE
Président,
Comité des Matériaux
pour Barrages en Remblai

(*) Rapport préparé par R. Corda et H. Grassinger, membres du Comité des Matériaux pour Barrages, avec l'assistance de K. Rienössl (Comité National Autrichien) et J. Combelles, J. Couprie, P. Huot, V. Lelu, D. Loudière et P. Paccard (Comité National Français).

FOREWORD

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

Since that time, new and improved materials became available and the experience gained has resulted in a better understanding of their use and in advanced engineering skills in this field so that they have been used in higher dams than before.

The application of geomembranes was extended to new areas such as enhancing the water-retaining performance of other facings, repairing old gravity dams and the deteriorated upstream concrete facings of fill dams. Lastly, new ideas have been developed regarding drainage, supporting layer and protective covering and geomembranes are being considered for the upstream facings to roller compacted concrete dams.

This new edition updates the data and recommendations of the first one and reviews the new information and practices that have appeared in the meantime.

This revision was prepared jointly by the French and the US National Committees on Large Dams, with assistance from the Italian National Committee. The authors deserve our warmest appreciation.

G. S. LAROCQUE
Chairman,
Committee on Material
for Fill Dams

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

1. INTRODUCTION

Définition

En accord avec la pratique courante de l'ingénierie, le terme de « géomembrane » est employé ici pour désigner des matériaux étanches et souples d'une épaisseur de l'ordre du millimètre. Une gamme étendue de polymères et de produits à base de bitume est utilisée pour leur fabrication. Ce matériau est le plus souvent placé près du parement amont d'un barrage; il est en général protégé extérieurement. Le produit utilisé est habituellement fabriqué en usine puis transporté et assemblé sur le site concerné. Certains matériaux sont parfois confectionnés directement sur le site (membranes *in situ*).

Nous appellerons « dispositif d'étanchéité par géomembrane », l'ensemble des couches superposées nécessaires à la réalisation, à la mise en œuvre et à la protection de la membrane. Dans la plupart des cas, ce dispositif comporte trois couches : une couche support, une géomembrane imperméable et une couche de protection.

Plan de l'étude

Le chapitre II étudie la classification et les caractéristiques des géomembranes. Il présente en outre les spécifications et les essais de ces matériaux.

Le chapitre III étudie les contraintes auxquelles la géomembrane est exposée.

Le chapitre IV présente diverses recommandations en matière de conception, de construction et d'utilisation. Ces recommandations peuvent permettre d'éviter certains désagréments qui ont marqué la période de développement de ces techniques. Les échecs ne sont cependant pas évoqués dans ce bulletin.

Les chapitres V et VI traitent de la réhabilitation des masques en béton et des barrages poids à l'aide de géomembranes.

En annexes sont citées les principales références d'utilisation de géomembranes sur divers barrages.

Une terminologie est également annexée.

Champ d'application

Pour la CIGB, l'expression « grands barrages » désigne des ouvrages d'une hauteur supérieure à 15 m. Néanmoins quelques cas intéressants de barrages de dimensions plus modestes ont été cités. Des géomembranes ont été utilisées avec succès depuis de nombreuses années comme élément d'étanchéité principal dans des barrages en remblai atteignant 32 m de hauteur. Elles ont été employées en outre dans des barrages de hauteur nettement supérieure, soit pour améliorer l'étanchéité de certaines parties de barrage, soit pour réparer notamment des masques de béton.

1. INTRODUCTION

Definition

Consistent with current engineering practice, the term “ geomembrane ” is used here for polymeric membranes which constitute flexible watertight material with a thickness of one-half to a few millimetres. A wide range of polymers including plastics, elastomers and blends of polymers are used in their manufacture. This material is ordinarily placed near the upstream face or on the upstream facing of a dam; in general, it is externally protected. The utilized product is usually prefabricated from manufactured sheets in a fabrication plant and then transported to the site. Some materials are prepared and positioned directly on the site (*in situ*).

We shall call “ geomembrane facing ” the whole system of superposed layers necessary for the construction, placement and the preservation of the impervious facing. In most cases, there are three such layers : a supporting layer, an impervious membrane, and a protective layer.

Content of Report

Chapter 2 studies the classification and characteristics of geomembranes. It further discusses materials specifications and tests.

Chapter 3 describes the stresses and loads to which geomembranes are exposed.

Chapter 4 makes recommendations on design, construction and operation. These recommendations may prevent the recurrence of some disappointments which characterised the development period of the techniques. These failures are not dealt with in this Bulletin.

Chapters 5 and 6 deal with geomembranes for repairs to concrete facings to embankment dams and concrete dams.

The leading references on the use of geomembranes on various dams appear in the Appendices.

An Appendix also contains a list of geomembrane technology terms and definitions.

Scope

A large dam as defined by ICOLD is a structure more than 15 m high. Nevertheless, some interesting smaller structures are mentioned. Geomembranes have been successfully used as the main impervious components for many years on embankment dams up to 32 m high, and they have also been employed for much higher dams, to improve the watertightness of certain parts or to repair deteriorated concrete facings.

Les présentes recommandations peuvent naturellement s'appliquer pour la plupart à des barrages d'une hauteur inférieure à 15 m, à l'étanchement des remblais, des canaux ainsi qu'aux bassins et réservoirs de toute nature.

Enfin, des géomembranes peuvent constituer un écran d'étanchéité interne d'un barrage en remblai. Cependant, cette technique n'étant pas encore très développée n'est pas traitée dans le présent bulletin.

**

Lorsque la sécurité publique est en jeu, toute disposition doit être prise pour qu'une dégradation importante de la membrane n'entraîne pas la ruine du barrage. Il convient en outre d'attirer l'attention sur le fait que la conception et la structure des ouvrages doivent comporter des dispositions permettant la réparation des géomembranes.

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

Although geomembranes may be placed internally to fill dams, this technique is not yet widespread and is not dealt with in this Bulletin.

*

**

Where public safety is involved, proper engineered safeguards must be incorporated to ensure that serious damage to the membrane does not lead to the collapse of the dam. Furthermore, it is important to remember that the dam must be designed and built in such a way as to provide for subsequent repair of the membrane.

2. MATÉRIAUX - ESSAIS - VIEILLISSEMENT

2.1. LES MATÉRIAUX

2.1.1. Composants de base

Les géomembranes utilisées en génie civil sont des produits minces, souples, continus et étanches même sous les déformations que peut subir le matériau en service.

Elles se composent de polymères synthétiques ou de produits à base de bitume renforcés ou non; elles sont fabriquées en usine ou sur le site de la construction. Les revêtements en terre compactée renfermant différents types d'additifs manufacturés ou naturels et les revêtements à surface dure tels que les métaux, le béton, la gunite, le béton bitumineux et le sol stabilisé au ciment ne sont donc pas considérés comme des géomembranes. Il en est de même des écrans manufacturés à base d'argile.

Les polymères de synthèse

Les polymères sont des composés chimiques d'un poids moléculaire élevé. Les types de polymères les plus communément utilisés actuellement comme produits de base pour la fabrication des géomembranes peuvent être classés de la manière suivante (les symboles entre parenthèses sont consacrés par l'usage en France).

1. Les thermoplastiques : polychlorure de vinyle (PVC); PVC résistant aux huiles (PVC-OR); thermoplaste PVC nitrile (TN-PVC); l'alliage éthylène interpolymère (EIA).

2. Les thermoplastiques cristallins : polyéthylène à basse densité (LDPE); polyéthylène à haute densité (PEHD); alliage polyéthylène à haute densité (PEHD-A); polyéthylène à moyenne densité; polyéthylène linéaire à basse densité; polypropylène.

3. Les élastomères : caoutchouc isoprène-isobutylène (IIR) communément appelé caoutchouc butyl; éthylène-propylène diène monomère (EPDM); polychloroprène (CR) également appelé couramment « néoprène »; épichlorohydrine caoutchouc (CO).

4. Les élastomères thermoplastiques : polyéthylène chloré (CPE); alliage polyéthylène chloré (CPE-A); polyéthylène chlorosulfoné (PECS) appelé couramment « hypalon »; éthylène propylène diène monomère thermoplastique (T-EPDM).

Les matériaux bitumineux

Ce sont des mélanges d'hydrocarbures d'un poids moléculaire élevé obtenus soit à partir de produits naturels, soit plus généralement sous forme de sous-produits de distillation du pétrole. Ils présentent un comportement visco-élastique, c'est-à-dire que leur déformation peut dépendre non seulement de la charge, mais aussi de sa durée d'application et de la température.

2. MATERIALS, TESTING, AGEING

2.1. MATERIALS

2.1.1. Base Components

Geomembranes used in civil engineering are flexible thin-film materials which retain their low permeability under service strains.

They are composed of synthetic or asphaltic materials, unreinforced or reinforced with fabric, made in a factory or applied *in situ* (i.e. at the construction site). Compacted earth linings incorporating various types of manufactured or natural additives, and hard linings such as steel, concrete, gunite, asphaltic concrete and soil cement are not considered as geomembranes, nor are processed clay-based barriers.

Synthetic Polymers

Polymers are chemical compounds of high molecular weight. The most common types presently used as base products in the manufacture of synthetic geomembranes can be classified as follows (symbols in parentheses are adopted from symbols used in the United States by the National Sanitation Foundation Joint Committee on Flexible Membrane Liners) :

1. Thermoplastics : Polyvinyl Chloride (PVC); Oil Resistant PVC (PVC-OR); Thermoplastic Nitrile-PVC (TN-PVC); Ethylene Interpolymer Alloy (EIA).

2. Crystalline Thermoplastics : Low Density Polyethylene (LDPE); High Density Polyethylene (HDPE); High Density Polyethylene Alloy (HDPE-A); Medium Density Polyethylene (MDPE); Linear Low Density Polyethylene; Polypropylene.

3. Elastomers : Isoprene-Isobutylene Rubber (IIR), also commonly referred to as Butyl Rubber; Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM); Polychloroprene (CR), also commonly referred to as " Neoprene "; Epichlorohydrin Rubber (CO).

4. Thermoplastic Elastomers : Chlorinated Polyethylene (CPE); Chlorinated Polyethylene-Alloy (CPE-A); Chlorosulfonated Polyethylene (CSPE), also commonly referred to as " Hypalon "; Thermoplastic Ethylene-Propylene Diene Monomer (T-EPDM).

Bituminous

Mixes of high molecular weight hydrocarbons obtained either from natural deposits or as a by-product of petroleum distillation. They exhibit viscoelastic behaviour, i.e. their deformation may depend not only on the load, but on its duration and on the temperature.

On peut distinguer :

- les bitumes de distillation directe;
- les bitumes soufflés, moins sensibles à la température;
- les émulsions de bitume utilisables à froid;
- les bitumes avec additifs : bitume caoutchouc, bitume soufre, etc.;
- les associations de bitume et d'élastomère ou de plastomère dits bitumes modifiés dont le comportement est semblable à celui des matériaux thermofixés (polyacrylamide et copolymère de bitume), les thermoplastiques (polyéthylène et bitume) ou les élastomères (SBS = bitume styrène - butadiène styrène).

Le comportement de ces deux catégories de matériaux, est résumé au tableau de la Fig. 1 ci-après.

2.1.2. Additifs aux composants de base

Les géomembranes comportent généralement différents additifs aux matériaux de base :

- des charges minérales, du carbone, des fillers calcaires, de la poudre d'ardoise, etc.;
- des agents stabilisants, du noir de carbone (utilisé notamment dans la fabrication du polyéthylène et de certains PVC);
- des plastifiants (utilisés notamment dans la fabrication du PVC);
- des agents fongicides : herbicides, algicides, bactéricides;
- des auxiliaires de transformation;
- des fibres et des élastomères (notamment pour les géomembranes bitumineuses).

2.1.3. Renforcement

Le renforcement d'une géomembrane peut être pratiqué notamment pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- pour conférer de la stabilité au composé au cours du processus de fabrication;
- pour donner une stabilité dimensionnelle aux géomembranes qui rétréciraient ou s'agrandiraient par suite de variations de température;
- pour augmenter la résistance (à la traction, au déchirement, au poinçonnement, à la perforation) et le module d'élasticité de la géomembrane.

Lorsque les renforts utilisés sont des nappes continues, la géomembrane est dite armée. Selon le type de géomembrane, l'armature pourra être :

- un géotextile non tissé : polyester, polypropylène, polyamides, verre,
- un géotextile tissé : polyester, polypropylène, polyamides, verre,
- une géogrille : polyester, polyamides, verre.

Un renforcement par armature réduit de manière importante l'élongation à la rupture de la membrane.

One may distinguish :

- bitumens from direct distillation;
- blown bitumens, which are less susceptible to temperature;
- bituminous emulsions which may be utilized cold;
- bitumens with additives : rubber bitumens, sulphur bitumens, etc.;
- modified bitumens, being mixes of bitumen with elastomer or plastomer, whose behaviour is like that of heat-setting materials (polyacrylamide and bitumen copolymer), thermoplastics (polyethylene and bitumen) or elastomers (SBR and bitumen).

The behaviour of these two categories of material (synthetic and bituminous) is summarized in Fig. 1.

2.1.2. Additives to Base Materials

In addition to the base materials, compounds used in geomembranes generally include various additives :

- mineral fillers, carbon, calcareous filler, slate powder, etc.;
- stabilizers, carbon black (used notably in the manufacture of polyethylene and some PVCs);
- plasticizers (used notably in the manufacture of PVC to impart flexibility);
- fungicides, herbicides, algicides and bactericides;
- processing aids;
- fibres and elastomers (typically compounded with bituminous membranes).

2.1.3. Reinforcement

Fabric reinforcement is used for one or more of the following reasons :

- to impart stability to the compound during the manufacturing process;
- to confer dimensional stability to geomembranes that would otherwise shrink or expand as a result of temperature changes;
- to increase geomembrane tensile, tear, burst and puncture strength and modulus.

If the reinforcement is in the form of continuous layers, the term “ reinforced geomembrane ” is applicable. The following reinforcements are used in different types of geomembrane :

- non-woven geotextile : polyester, polypropylene, polyamides, glass;
- woven fabric geotextile : polyester, polypropylene, polyamides, glass;
- grid : polyamides, glass.

Reinforced geomembranes exhibit greatly reduced strain at failure.

Fig. 1
COMPORTEMENT DES GRANDES FAMILLES DE GÉOMEMBRANES
 D'après le Comité Français des Géotextiles et Géomembranes

	GÉOMEMBRANES DE SYNTHÈSE		GÉOMEMBRANES BITUMINEUSES	
	ÉLASTOMÈRES	PLASTOMÈRES	BITUME OXYDÉ	BITUME MODIFIÉ AUX ÉLASTOMÈRES
COMPORTEMENT GÉNÉRAL	Élastique	Plastique	Viscoplastique	Viscoélastique
COMPORTEMENT SOUS CONTRAINTE IMPOSÉE	Allongement élastique constant fonction de la contrainte. La déformation disparaît avec la contrainte	Pour une contrainte supérieure au seuil d'écoulement : <ul style="list-style-type: none"> ● fluage ● déformation partiellement irréversible après cessation de la contrainte 	Même comportement que les plastomères avec une valeur différente pour le seuil	Même comportement que les élastomères mais avec limite élastique très liée à la nature des sollicitation
COMPORTEMENT SOUS ALLONGEMENT IMPOSÉ	Reste sous tension	Relaxation partielle de la contrainte	Relaxation de la contrainte	Relaxation importante de la contrainte
INFLUENCE D'UNE TEMPÉRATURE ÉLEVÉE	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne à forte
SOUPLESSE A FROID	Très bonne	Bonne : variable suivant les produits	Faible	Bonne à variable suivant nature et teneur de l'élastomère
SOUDURE THERMIQUE	Impossible si réticulé	Très facile	Très facile	Très facile
SOUDURE PAR SOLVANT SEUL	Difficile à impossible si réticulé	Oui, suivant produit	Non réalisable	Non réalisable
COLLAGE	Difficile	Possible ou impossible selon le cas	Facile mais plus onéreux que la soudure thermique	Facile mais plus onéreux que la soudure thermique
VULCANISATION	Possible mais délicate	Sans objet	Sans objet	Sans objet

Fig. 1
PROPERTIES OF MAIN GEOMEMBRANE MATERIALS
 (Source : French Geotextile & Geomembrane Committee)

	SYNTHETICS		BITUMINOUS	
	ELASTOMERS	THERMO-PLASTICS	OXIDIZED BITUMEN	BITUMEN-ELASTOMER
BEHAVIOUR	Elastic	Plastic	Viscoplastic	Viscoplastic
STRESS BEHAVIOUR	Constant elastic strain vs stress. Strain recoverable	Creep and partially irrecoverable strain beyond yield point	As for plastomers with different yield point value	As for elastomers elastic limit sensitive to type of loading
STRAIN BEHAVIOUR	Tension maintained	Partial stress relief	Stress relief	Substantial stress relief
HIGH TEMPERATURE	Little effect	Moderate effect	Major effect	Moderate to major effect
COLD TEMPERATURE FLEXIBILITY	Very good	Good, varies with different products	Poor	Good to variable depending on elastomer type and content
THERMAL WELDS	Impossible if cross-linked	Very easy	Very easy	Very easy
SOLVENT WELDS	Difficult if cross-linked	Yes, depending on product	Not feasible	Not feasible
ADHESIVE	Difficult	Possible or not	Easy but more costly than heat welding	Easy but more costly than heat welding
VULCANISATION	Possible but requires care	Not applicable	Not applicable	Not applicable

2.1.4. Assemblage

Les géomembranes sont le plus souvent préfabriquées en usine sous forme de lés conditionnés en rouleaux.

Après leur fabrication, certaines géomembranes peuvent être préassemblées en usine ou en atelier proche du site pour former de grandes nappes. Les géomembranes utilisées au Mont Elbert Forebay Reservoir (USA) par exemple, ont été fabriquées en deux panneaux de 61 m sur 21 et de 30 m sur 43, chacun ayant une surface de 1 300 m².

A l'issue de leur fabrication en usine, les panneaux sont roulés ou pliés en accordéon ou mis en palettes pour être transportés sur le site de leur utilisation.

Selon le matériau constitutif de la géomembrane, il existe diverses méthodes chimiques et thermiques pour l'assemblage. Les Fig. 2 et 3 présentent les principales méthodes d'assemblage.

Fig. 2

MÉTHODES DE SOUDURE THERMIQUE DES GÉOMEMBRANES

MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DE LA MEMBRANE	Air chaud		Chalumeau S	Bitume chaud S	Lame métallique		Diélectrique S	Extrusion S
	U	S			U	S		
Thermoplastiques								
Chlorure de polyvinyle (PVC)	×	×					×	
PVC - nitrile (TN-PVC)	×	×					×	
Alliage éthylène interpoly- mère (EIA)	×	×						
Thermoplastiques cristal- lins								
Polyéthylène à basse densité (PEBD)		×			×	×		
Polyéthylène à haute den- sité (PEHD)		×			×	×		×
Élastomères								
Caoutchouc butyl (HR)								
Éthylène propylène diène monomère (EPDM)								
Néoprène (polychloro- prène)								
Épichlorohydrine caout- chouc (CO)								
Élastomères thermoplasti- ques								
Polyéthylène chloré (CPE)	×	×						×
Polyéthylène chloro sulfoné (PECS)	×	×						×
Thermoplastique (T- EPDM)	×	×						
Membranes bitumineuses		×	×	×				

Note : U = soudure en usine ou en atelier.
S = soudure sur le site.

2.1.4. Fabrication

Geomembranes are usually manufactured and delivered in rolls.

Some are then formed into large panels or blankets, by seaming strips together in a fabrication plant or on site. For example, the geomembranes used at Mt Elbert Forebay Reservoir (USA) were fabricated in two blanket shapes 61 m by 21 m and 30 m by 43 m, each 1 300 m² in size.

Upon completion of factory fabrication, the blankets or panels are rolled and/or accordeon-folded on pallets for shipment to the jobsite.

Depending on the particular membrane material, various chemical and thermal methods are available for seaming. Fig. 2 and 3 list the most common geomembrane seaming methods.

Fig. 2
GEOMEMBRANE THERMAL WELDING METHODS

MEMBRANE MATERIAL	Hot Air		Flame Gun F	Hot Bitumen F	Hot Wedge		Dielectric M	Extrusion	
	M	F			M	F		M	F
Thermoplastics									
Polyvinyl chloride (PVC)	×	×					×		
Nitrile-PVC (TN-PVC)	×	×					×		
Ethylene interpolymer alloy (EIA)	×	×							
Crystalline Thermoplastics									
Low density polyethylene (HDPE)		×			×	×			
High density polyethylene (HDPE)		×			×	×			×
Elastomers									
Butyl rubber (IIR)									
Ethylene propylene diene monomer (EPDM)									
Neoprene (polychloroprene)									
Epichlorohydrin rubber (CO)									
Thermoplastic Elastomers									
Chlorinated polyethylene (CPE)	×	×							×
Chlorosulphonated polyethylene (CSPE)	×	×							×
Thermoplastic EPDM (T-EPDM)	×	×							
Bituminous Membranes		×	×	×					

Note : M = Manufactured or factory seams.
F = Field fabrication.
× = Method applicable.

Fig. 3
MÉTHODES DE SOUDURE PAR SOLVANT,
COLLAGE ET VULCANISATION

MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DE LA GÉOMEMBRANE	Solvant		Adhésif et solvant		Collage par adhésif		Vulcanisation		Bandes
	U	S	U	S	U	S	U	S	S
Thermoplastiques									
Chlorure de polyvinyle (PVC)	×	×	×	×	×	×			×
PVC - nitrile (TN-PVC)	×	×	×	×	×	×			×
Alliage éthylène interpolymère (EIA)									
Thermoplastiques cristallins									
Polyéthylène à basse densité (PEBD)					×	×			×
Polyéthylène à haute densité (PEHD)					×	×			×
Élastomères									
Caoutchouc butyl (HR)					×	×	×	×	×
Éthylène propylène diène monomère (EPDM)					×	×			×
Néoprène (polychloroprène)					×	×			×
Épichlorohydrine caoutchouc (CO)					×	×			×
Élastomères thermoplastiques									
Polyéthylène chloré (CPE)	×	×	×	×	×	×			×
Polyéthylène chloro sulfoné (PECS)	×	×	×	×	×	×			×
Thermoplastique (T-EPDM)					×	×			
Membranes bitumineuses						×	(1)		

Note : U = soudure en usine ou en atelier.
S = soudure sur le site.
(1) = le produit adhésif est dans ce cas du bitume.

2.1.5. Géomembranes fabriquées en place

La géomembrane peut être réalisée sur le site même. Elle est constituée de produits qui sont appliqués sous forme liquide à froid ou à chaud, généralement par imprégnation d'un géotextile déposé sur la couche support.

Cette solution évite d'avoir à réaliser des joints entre lés ou panneaux. Par contre, il est plus difficile de garantir l'homogénéité du produit et la constance de l'épaisseur.

Fig. 3
GEOMEMBRANE SOLVENT AND ADHESIVE SEAMING METHODS

MEMBRANE MATERIAL	Solvent		Solvent Adhesive		Adhesive		Vulcanisation		Tape
	M	F	M	F	M	F	M	F	F
Thermoplastics									
Polyvinyl Chloride (PVC)	×	×	×	×	×	×			×
Nitrile-PVC (TN-PVC)	×	×	×	×	×	×			×
Ethylene Interpolymer Alloy (EIA)									
Crystalline Thermoplastics									
Low Density Polyethylene (LDPE)					×	×			×
High Density Polyethylene (HDPE)					×	×			×
Elastomers									
Butyl Rubber (IIR)					×	×	×	×	×
Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM)					×	×			×
Neoprene (polychloroprene)					×	×			×
Epichlorohydrin Rubber (CO)					×	×			×
Thermoplastic Elastomers									
Chlorinated Polyethylene Chlorosulphonated (CPE)	×	×	×	×	×	×			×
Polyethylene (CSPE)	×	×	×	×	×	×			×
Thermoplastic EPDM (T-EPDM)					×	×			×
Bituminous Membranes						×	(1)		

Note : M = Manufactured or factory seams.
F = Field fabrication.
(1) = Bitumen used as adhesive.

2.1.5. *In situ* Geomembranes

Geomembranes may be produced on site instead of being factory manufactured. They consist of products applied hot or cold in liquid form which are generally used to impregnate a geotextile previously laid on the supporting layer.

This method removes the need for seaming roll widths or panels together. It is however more difficult to control the uniformity of the product and the thickness of the finished membrane by this method.

Les principaux produits utilisés sont :

- des polymères thermodurcissables, livrés en deux conditionnements séparés (base et durcisseur à mélanger au moment de l'emploi) : polyuréthanes époxydiques, polyesters;
- des polymères thermoplastiques : acryliques en émulsion, latex d'élastomères divers,
- des bitumes purs ou modifiés avec ou sans additifs.

2.1.6. Associations géotextiles-géomembranes

Un géotextile utilisé en association avec une géomembrane offre les avantages complémentaires suivants :

- il protège la géomembrane contre les agressions du support ou de la protection;
- il diminue les sous-pressions sous la géomembrane, en agissant comme couche drainante;
- il répartit les contraintes sous la géomembrane.

Géotextile et géomembrane peuvent être simplement superposés : ils sont alors livrés en rouleaux séparés. Ils peuvent aussi être assemblés en usine, et indissociables sans altération de la géomembrane : on parle alors de géomembrane composée.

Le bulletin n° 55 de la CIGB « Géotextiles : filtres et transitions pour barrages en remblai » donne des informations complémentaires sur les géotextiles.

2.2. LES ESSAIS DE GÉOMEMBRANE

2.2.1. Introduction

Les essais réalisés sur les géomembranes peuvent être classés en trois grands types :

- les essais de contrôle de fabrication;
- les essais d'identification-réception;
- les essais de performance.

Ces essais font souvent l'objet de normes. On trouvera en annexe 2 les références des normes les plus importantes dont nous avons eu connaissance.

2.2.2. Les essais de contrôle de fabrication

Ils sont réalisés par le fabricant en usine dans le but de contrôler la qualité de la production (contrôle des produits de base, des opérations, du produit fini).

2.2.3. Les essais d'identification-réception

Il s'agit des essais de base dont les résultats sont fournis par le producteur dans la fiche technique d'une géomembrane. Ces essais doivent être facilement vérifiables par l'utilisateur. Ils comprennent généralement :

- des essais portant sur la composition (analyses chimiques des composants,

The products most commonly used are :

- two-part thermosetting polymers (resin and hardener) mixed just prior to use : polyurethanes, epoxies, polyesters;
- thermoplastic polymers : acrylic emulsions, various elastomer rubbers;
- plain or modified bitumens with or without additives.

2.1.6. Geotextile/Geomembrane Combinations

A geotextile used in combination with a geomembrane provides the following additional benefits :

- protects the geomembrane against damage by the supporting or protective layer;
- eliminates the pore pressure build-up immediately under the geomembrane since the geotextile acts as a drainage layer;
- improves the stress distribution underneath the geomembrane.

The geomembrane may simply be laid under or on the geotextile, in which case they are delivered in separate rolls. Alternatively, they may be assembled in the factory so that they cannot subsequently be separated without damaging the geomembrane; the term “ composite geomembrane ” is used in this case.

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

2.2. GEOMEMBRANE TESTING

2.2.1. Introduction

The testing applicable to geomembranes can be classified under three main headings :

- quality control testing during manufacture;
- identification/acceptance testing;
- performance testing.

Standards have been issued on this subject, and Appendix 2 lists some of the more important international standards known to the authors.

2.2.2. Quality Control Testing

The manufacturer performs quality control tests in the works on materials, process and finished product to ensure an appropriate quality of manufacture.

2.2.3. Identification/Acceptance Testing

Identification/acceptance tests are performed by the manufacturer and results are recorded on the geomembrane specification. The tests must be such as to enable easy verification by the purchaser. They usually comprise :

- tests to determine chemical composition (chemical analysis of components,

analyses des composants par méthode spectrale infra rouge, analyse pour les matériaux composites du pourcentage de liant, d'armature, détermination de la perte au feu...);

— des essais portant sur les propriétés physico-chimiques (masse volumique, caractéristiques colorimétriques...);

— des essais portant sur les propriétés mécaniques et rhéologiques (traction unidimensionnelle, résistance au délaminage);

— des essais portant sur les propriétés thermiques et thermomécaniques (détermination de la température de transition vitreuse, analyse thermomécanique, température de fragilité au pliage, température de fragilité au choc, retrait thermique...).

Outre les résultats de ces essais, la fiche technique du producteur doit indiquer :

— les caractéristiques de fabrication :

- mode de fabrication;
- nature du ou des composants et des armatures éventuelles;
- couleur;

— la désignation commerciale de la géomembrane;

— la masse surfacique nominale et la tolérance;

— l'épaisseur nominale et la tolérance;

— le conditionnement des rouleaux (largeur, longueur, masse, diamètre) et les précautions de stockage;

— le mode d'assemblage des lés et les conditions limites de leur réalisation;

— les résultats des essais d'identification.

2.2.4. Les essais de performance de comportement

Les essais de comportement permettent la sélection par l'utilisateur de produits adaptés au barrage projeté.

Les essais d'identification évoqués précédemment ne constituent généralement pas des essais de comportement car ils ne permettent que rarement de conclure au rejet ou à l'acceptation d'une géomembrane face à une sollicitation ou une agression donnée. Ainsi, des essais de traction unidirectionnelle sur éprouvette étroite constituent des essais d'identification-réception. Ils caractérisent de manière simple et reproductible une géomembrane mais ne peuvent être pris en considération pour le calcul du comportement d'une géomembrane sollicitée dans un ouvrage. En effet, les éprouvettes utilisées pour ces essais sont de taille trop réduite pour être représentatives du comportement à grande échelle.

Il existe de nombreux essais de comportement des géomembranes, dont certains sont normalisés. On peut classer ces tests suivant qu'ils concernent le comportement hydraulique, mécanique ou de résistance aux conditions du milieu extérieur.

2.2.4.1. Perméabilité à l'eau

En fait, il est plus intéressant de raisonner en terme de permittivité K/e d'une géomembrane qu'en terme de perméabilité K . (e représente l'épaisseur de la géomembrane).

spectrographic analysis of component materials, infra red analysis, tests to determine percentages of basic material and reinforcement, thermoponderal analysis, etc.);

- tests of physical/chemical properties (density, chromometer properties, etc.);
- tests of mechanical and rheological properties (uniaxial tensile test, peel test);
- tests of thermal and thermomechanical properties (softening point, thermo-mechanical analysis, bend brittleness temperature, impact brittleness temperature, heat shrinkage, etc.).

In addition to the above information, the manufacturer's specification must show :

- manufacturing information : manufacturing process, component(s) and reinforcement (if any), colour;
- trade name of geomembrane;
- nominal weight per unit area and tolerance;
- nominal thickness and tolerance;
- roll details (width, length, weight, diameter) and care in storage;
- method of seaming and limitations;
- results of identification tests.

2.2.4. Performance Tests

Performance tests enable the purchaser to select the best product for the project.

The identification tests mentioned above cannot be considered as sufficient for performance test purposes since they do not yield sufficient information to accept or reject a geomembrane with reference to a specified type of loading or attack. For example, the uniaxial tensile test on narrow specimens is an identification/acceptance test which characterises a geomembrane in a simple reproducible manner but is not relevant for analysing the performance of a stressed geomembrane in a dam, since the test specimens are too small to be representative of full-scale behaviour.

There are many geomembrane performance tests, some of which are the subject of national or international standards. They can be classified according to whether they refer to performance with respect to water, mechanical loads or environmental conditions.

2.2.4.1. Permeability to Water

It is more convenient to analyse a geomembrane in terms of its permittivity K/e rather than its permeability K (e being the geomembrane thickness).

La permittivité peut être obtenue en mesurant en laboratoire la quantité d'eau traversant un échantillon sous un gradient hydraulique et pendant un temps donné.

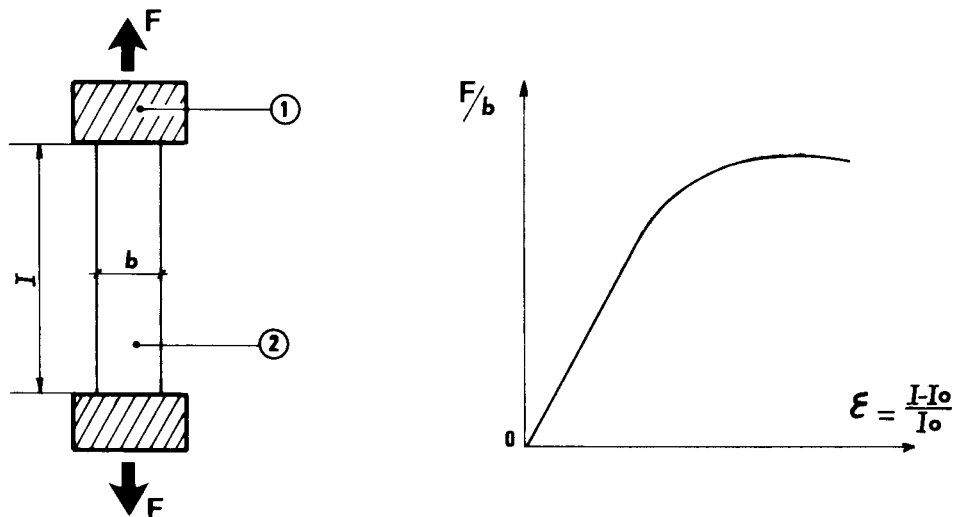
En pratique, les valeurs de permittivité mesurée sont très faibles (de l'ordre de 10^{-11}s^{-1}) et l'on peut considérer que les géomembranes sont parfaitement étanches et que tout problème de fuite est lié à des défauts locaux, aux modalités d'assemblage ou à une modification des caractéristiques du matériau. Lorsque le matériau est soumis à un effort de traction, la permittivité peut augmenter notablement.

La mesure de permittivité peut s'appliquer aussi sur les joints.

2.2.4.2. Essais de performance mécanique

a) Traction simple

Un essai de traction simple consiste à soumettre un échantillon de géomembrane, généralement en forme de bande rectangulaire, à une force F unidirectionnelle et à mesurer la déformation correspondante. Les résultats sont représentés par une courbe effort-déformation allant jusqu'aux valeurs de la rupture. La Fig. 4 indique le principe de cet essai.



Il est important de noter que le mode opératoire de l'essai a une forte influence sur le résultat, notamment la forme de l'éprouvette et la vitesse de déplacement.

Du point de vue de l'ingénieur, la connaissance précise des valeurs à la rupture (déformation et contrainte) est moins utile que la courbe effort déformation dans son ensemble.

Des essais de fluage (étude de la déformation à charge constante) et de relaxation (étude de l'évolution de la contrainte à déformation constante) constituent des compléments indispensables à l'essai de traction simple à vitesse de déformation imposée (constante).

Permittivity can be calculated by measuring, in the laboratory, the quantity of water passing through the specimen under a specified hydraulic gradient in a specified time.

In practical terms, measured permittivity is very low (of the order of $10^{-11}/s^{-1}$) and geomembranes can be considered as perfectly watertight, leakage being confined to local damage or deterioration of the properties of the material. If the material is stretched, its permittivity may increase significantly.

The permittivity concept is also applicable to seams.

2.2.4.2. Mechanical Strength

a) Uniaxial Tensile Strength

In the pure tension test, a sample of the geomembrane, usually rectangular in shape, is subjected to a uniaxial force F and the resulting strain measured. Results are plotted on a stress strain curve up to failure. Fig. 4 illustrates the test method.

Fig. 4

Tensile Test and Stress Strain Curve.

Principe de l'essai de traction simple et courbe effort-déformation.

(1) Clamp.

(2) Geomembrane Sample.

(F) Applied Tension.

(1) *Mors de serrage.*

(2) *Échantillon de géomembrane.*

(F) *Traction appliquée.*

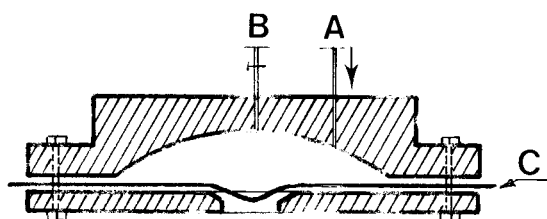
It is important to note that the test procedure used has a strong influence on results, especially the specimen shape and strain rate.

From the engineering viewpoint, the stress and strain at failure are less important than the general appearance of the stress strain curve.

Creep tests to determine strain development at constant load and relaxation tests for stress reductions at constant strain are essential complements to the strain-controlled uniaxial tensile test.

b) Essai d'éclatométrie

Il s'agit d'un essai de traction bidimensionnelle avec déformation sphérique. L'essai consiste à appliquer une pression d'eau sur un échantillon de géomembrane reposant sur un support métallique rigide en forme de disque, au centre duquel est aménagé un orifice circulaire de diamètre donné (Fig. 5).



Sous l'effet de la pression appliquée, la géomembrane se déforme en calotte sphérique. Il est possible en mesurant l'amplitude de cette déformation de calculer la contrainte et la déformation en tout point de la calotte sphérique pour chaque pression appliquée. Les résultats peuvent ainsi être représentés sous forme de courbe effort-déformation comparable à celle de l'essai de traction simple.

Les ruptures sont en général observées pour des déformations plus faibles que dans l'essai de traction simple. En effet, dès l'amorce d'une micro-fissure, le passage de l'eau sous pression entraîne l'éclatement de la géomembrane. Par suite, l'essai d'éclatométrie indique des limites plus réalistes que l'essai de traction simple en ce qui concerne l'utilisation des géomembranes sous déformation.

c) Essais de frottement

L'essai de frottement est destiné au dimensionnement des pentes du dispositif d'étanchéité par géomembrane. Le principe de l'essai est celui du cisaillement à la boîte de Casagrande, utilisée classiquement en mécanique des sols.

Les caractéristiques de frottement entre géomembrane et différents matériaux granulaires ou des géotextiles ont ainsi été publiées mais, dans le cadre d'un projet donné, il est prudent de procéder à des essais spécifiques en tenant compte de la contrainte normale en service.

Certaines géomembranes sont fabriquées avec des surfaces rugueuses ou sont associées en usine à un géotextile pour améliorer leurs caractéristiques de frottement.

d) Essais de poinçonnement

Un des problèmes majeurs auxquels se trouve confronté le projeteur consiste à prévoir la pérennité de l'étanchéité d'une géomembrane au contact de sa structure support et de sa structure de protection éventuelle lors de la mise en œuvre et en

b) Burst Strength

The burst test is a two-dimensional tensile test in which the specimen deforms spherically. Water pressure is applied to a geomembrane specimen clamped against a rigid metal disk having a circular hole at its centre, of a specified diameter (Fig. 5).

Fig. 5

Burst Test Apparatus.

Schéma de l'appareillage d'éclatométrie.

(A) Water in.

(B) Air Vent.

(C) Geomembrane.

(A) Arrivée d'eau.

(B) Purge d'air.

(C) Géomembrane.

A spherical blister forms in the specimen under the applied pressure. By measuring the amplitude of the deformation, one can calculate the stress and strain at any point on the blister for a given applied pressure. The results can be plotted on a stress strain curve comparable to the uniaxial test stress strain curve.

Failure usually occurs at lower strains than in the uniaxial tensile test. As soon as a micro-fissure appears, the pressure of the outflowing water causes the geomembrane to burst. The burst strength test therefore yields more realistic strength limits than the uniaxial tensile test in terms of geomembrane performance in situations where deformation is a factor.

c) Frictional Characteristics

Friction performance tests have been developed as an aid to designing the slopes for geomembrane-based watertight components to dams. The test is based on the Casagrande shear box apparatus that is standard apparatus in soil mechanics testing.

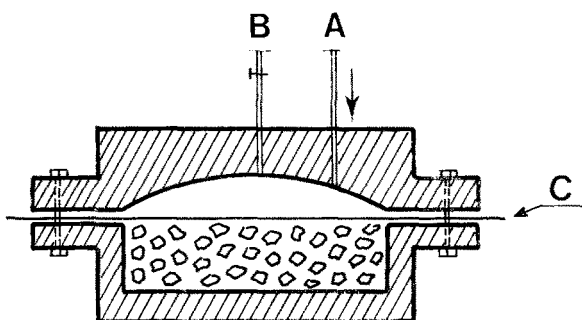
The frictional characteristics between geomembrane and different granular materials and geotextiles have been published but it is wise to undertake specific tests for any new project, based on expected normal stress levels. Some geomembranes are manufactured with a rough finish or are bonded to a geotextile to increase friction.

d) Static Puncture Strength

One of the most important problems facing the designer is predicting the durability of the water-excluding performance of a geomembrane in contact with its supporting structure and protective structure if any, when the dam has been

exploitation de l'ouvrage. Un poinçonnement de la géomembrane est en effet à craindre dans le cas de matériaux en contacts agressifs avec pour conséquence d'importantes fuites localisées.

Un essai de poinçonnement hydraulique a été développé dans cette optique. Une pression hydrostatique est appliquée sur une géomembrane reposant sur un support agressif comme indiqué par la Fig. 6. On mesure soit le temps de rupture sous une pression donnée, soit la pression de rupture lors d'une mise en pression progressive.



e) Essai de déchirement

Les essais de déchirement d'une géomembrane dans un but de dimensionnement doivent être réalisés spécifiquement de manière à simuler le processus de déchirement lié au chantier. Il existe aussi différents tests normalisés, mais il n'est pas possible de les considérer comme des essais de comportement.

f) Essai de perforation

Le but de l'essai consiste à évaluer le comportement d'une géomembrane soumise à l'impact d'un objet pointu. Il existe différentes normes ou projets de normes. Une méthode dite statique consiste à enfoncer à vitesse constante une tige à travers un échantillon de géomembrane maintenu par des colliers au niveau d'une ouverture. La force maximale à laquelle la géomembrane peut résister est déterminée.

Une méthode dite dynamique consiste à évaluer le comportement de la membrane à la chute d'un objet.

De tels essais peuvent servir à classer différentes membranes en fonction de leur comportement face à une perforation sans que l'on puisse s'en servir pour leur dimensionnement.

g) Essai de pelage

Il s'agit d'un essai de traction généralement réalisé sur le site pour vérifier la qualité des joints. L'éprouvette est découpée perpendiculairement à l'axe d'une

completed and gone into operation. There is a danger of the geomembrane being punctured if it is in contact with angular materials, resulting in heavy localised leakage.

A hydraulic puncture test has been developed for this purpose. A hydrostatic pressure is applied to a geomembrane resting on a critical subgrade, as shown in Fig. 6. The object is to measure either the time to failure under a specified pressure or pressure at failure when gradually increasing the applied pressure.

Fig. 6

Puncture Strength Test Apparatus.
Schéma de l'essai de poinçonnement.

- | | |
|------------------|--------------------|
| (A) Water in. | (A) Arrivée d'eau. |
| (B) Air Vent. | (B) Purge d'air. |
| (C) Geomembrane. | (C) Géomembrane. |

e) Tear Strength

Geomembrane tear strength tests for project design purposes must be representative of the specific tearing process to which the material will be exposed in the project. There are various standard test methods but they cannot be considered suitable as performance tests.

f) Impact Strength

The purpose of the perforation test is to evaluate the performance of the geomembrane on impact by a pointed object. Various standard and tentative methods exist. A "static" test calls for forcing a rod at constant speed through a geomembrane specimen clamped between a pair of collars over a hole. The test determines the maximum force which the geomembrane can resist. A "dynamic" test involves dropping an object on the test specimen.

Such tests can be used to classify different membranes according to their perforation performance but they cannot be used for design purposes.

g) Seam Peel Strength

The peel test is mainly a site test for seaming quality control. The specimen is cut perpendicular to a welded or glued seam. The apparatus grips the edges of each

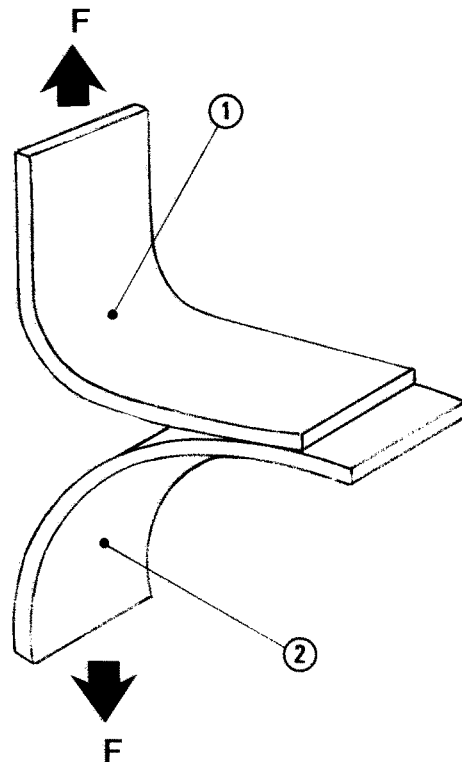
soudure ou d'un collage. La traction unidirectionnelle s'exerce d'une part sur le bord libre d'une des deux feuilles, d'autre part sur le bord excédentaire côté soudure ou collage de l'autre feuille (Fig. 7). Bien que peu représentatif du comportement en service, c'est l'essai le plus utile pour évaluer la résistance d'un assemblage.

h) Résistance à la traction sur un joint

L'échantillon est découpé perpendiculairement à un joint et soumis à une traction simple (voir *a*). Cet essai est souvent utilisé comme contrôle de réception sur le terrain. Il est cependant moins sélectif que le précédent puisqu'intervient la surface effectivement assemblée.

2.2.4.3. Essais de performance dans les conditions du milieu

Cette classe d'essais comprend un grand nombre de tests possibles, consistant à étudier le comportement d'une géomembrane soumise à l'action de produits chimiques, de radiations (UV essentiellement) et de micro-organismes. L'influence de la température joue un rôle majeur, qu'il s'agisse des températures élevées ou basses ou des cycles gel-dégel.



sheet, so that they are peeled apart (Fig. 7). Although not representative of *in situ* conditions, this is the most valuable test for assessing seam strength.

h) Seam Shear Strength

The specimen is cut perpendicular to the seam for tensile testing as in a) above. While often used as a field quality assurance test, it is less selective than the peel test because it includes the bonded surface.

2.2.4.3. Environmental Performance Tests

This category comprises a large number of possible tests in which the behaviour of a geomembrane is studied with respect to its resistance to chemicals, radiation (chiefly ultra violet) and micro-organisms. Temperature is a very important factor (high, low, freeze-thaw cycles).

Fig. 7

Peel Test.

Essai de pelage.

- (1) Top Strip.
- (2) Bottom Strip Overlap.
- (F) Uniaxial Tension.

- (1) *Feuille supérieure.*
- (2) *Bord excédentaire de la feuille inférieure.*
- (F) *Traction unidirectionnelle.*

a) Produits chimiques, ozone

Selon le site et l'utilisation du plan d'eau, les produits en contact avec la géomembrane peuvent être divers (hydrocarbures, détergents...). Le contact est généralement accidentel.

Les méthodes d'essais consistent à immerger des échantillons de géomembrane dans une telle solution durant une période plus ou moins longue (6 mois par exemple) à une température donnée et à mesurer ensuite les altérations de composition chimique et de comportement physique (résistance à la traction par exemple).

L'ozone présent dans l'air est aussi susceptible d'agresser une géomembrane. Une méthode d'étude comparable est employée.

b) Radiations

Les échantillons sont soumis à des éclairagements par lampe ultra-violet, infra-rouge ou exposés au soleil dans une région à fort ensoleillement.

c) Comportement dans l'eau

Certains matériaux constitutifs de la membrane contiennent des ingrédients susceptibles de migrer dans l'eau à terme. On peut mettre en évidence leur résistance à la migration par un essai accéléré, par exemple après immersion pendant 14 jours dans l'eau à 60°.

d) Micro-organismes

Il existe deux sortes de tests :

- enfouissement dans des conditions sévères,
- test en laboratoire en présence d'un mélange de souches de micro-organismes (28 jours à 28 °C - 95 % d'humidité relative).

L'évolution des micro-organismes est observée.

e) Température

La température influe sur le comportement des géomembranes, les fortes températures ayant tendance à faire diminuer les caractéristiques mécaniques dans le temps. Ceci concerne principalement les géomembranes thermoplastiques.

Les essais mécaniques doivent donc être réalisés aux températures extrêmes du site. L'influence des cycles gel/dégel doit être étudiée selon les régions.

f) Utilisation de l'eau stockée

Si la retenue est destinée à l'alimentation en eau potable de populations, il conviendra de vérifier que la géomembrane est de qualité alimentaire.

a) Resistance to Chemicals and Ozone

Various substances such as hydrocarbons, detergents, etc. may come into contact with the geomembrane, depending on the site and the purpose of the reservoir. Such contact is usually accidental.

Tests consist of immersing the geomembrane specimens in the relevant substance for a suitable period of time (e.g. 6 months) at a given temperature, and then measuring any changes in chemical composition and physical properties (such as tensile strength).

Ozone in the air may also affect geomembranes. A similar test method is employed to study its effect.

b) Radiation

Specimens are exposed to ultra violet and infra red lamps and to sunlight (in regions with a high degree of sunshine) to test resistance to radiation effects.

c) Contact with Water

If the component materials in the geomembrane contain substances liable to migrate eventually into the water, an accelerated migration resistance test can be performed, e.g. by 14 days immersion in water at 60 °C.

d) Micro-organisms

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

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

e) Temperature

Temperature affects geomembrane performance, high temperature tending to cause mechanical properties to deteriorate with time. This applies chiefly to thermoplastic geomembranes.

Mechanical tests must therefore be performed under conditions reflecting the extreme temperatures at the project site. Some sites may need the effect of freeze-thaw to be examined.

f) Water Use

If the reservoir is designed for domestic water supply, appropriate tests must check that the geomembrane is compatible with the required water quality.

2.3. LE VIEILLISSEMENT DES GÉOMEMBRANES

2.3.1. Généralités

Le vieillissement d'une géomembrane est la détérioration progressive de ses caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques sous l'action des conditions courantes de son environnement :

- eau et sol en contact;
- rayonnement;
- gaz (ozone);
- chaleur;
- gel;
- micro-organismes;
- produits stockés (eau éventuellement polluée par des hydrocarbures, détergents...)

Par ailleurs, une sollicitation mécanique prolongée favorise en général le vieillissement.

Le concepteur d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane doit tenir compte du vieillissement, de la durabilité des différents produits disponibles sur le marché, et admettre la possibilité de devoir remplacer à terme une géomembrane. Bien sûr, le propriétaire du barrage doit être informé de cette éventualité.

Le comportement de longue durée dépend des caractéristiques de la géomembrane et de ses constituants et notamment de la présence de polymères, d'impuretés, d'adjuvants, d'un renforcement mécanique, ainsi que des modalités d'assemblage et de protection...

2.3.2. Comportement à long terme de quelques types de géomembranes

2.3.2.1. *Géomembranes bitumineuses*

Elles sont très stables à l'exposition aux rayons ultra-violet (UV) et résistent bien aux agressions par pollution chimique accidentelle du plan d'eau, à l'exception des hydrocarbures et des solvants organiques.

Non protégées, elles ont parfois tendance à se craqueler, du moins en surface, mais sans conséquence importante.

Ces géomembranes ont fait la preuve de leur efficacité pour étancher des barrages.

2.3.2.2. *Polychlorure de vinyle (PVC)*

L'exposition à la chaleur fait souvent perdre une partie des plastifiants des géomembranes en PVC. Ce phénomène amène une rigidification du produit, variable suivant les plastifiants utilisés.

Les produits traités en usine contre les rayons ultra-violet se comportent relativement bien à l'exposition au soleil.

Le comportement à long terme face à des solutions salines, acides ou à des hydrocarbures est satisfaisant, même si des baisses de caractéristiques chimiques et mécaniques ont été observées.

2.3. GEOMEMBRANE AGEING

2.3.1. General

Ageing of a geomembrane means the gradual deterioration in chemical, physical and mechanical properties caused by normal environmental conditions such as :

- water and soil in contact with the geomembrane;
- radiation;
- gas (ozone);
- heat;
- frost;
- micro-organisms;
- substances in reservoir (water which may be contaminated with hydrocarbons, detergents, etc.).

Prolonged stressing also usually affects ageing.

The designer of the geomembrane system must consider ageing and the durability of the various products available on the market, and accept the possibility that it may eventually become necessary to replace the membrane. The dam owner must of course be informed of this eventuality.

Long term performance depends on the characteristics of the geomembrane and its constituents, especially the presence (if any) of polymers, impurities, additives, reinforcement, etc., and on seaming practice and protection methods.

2.3.2. Long Term Performance of Geomembrane Types

2.3.2.1. Bituminous Geomembranes

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

If there is no protective layer, they may tend to craze, at least superficially, but without any important consequences.

This type of geomembrane has proved itself effective as a material for dam watertightness components.

2.3.2.2. Polyvinyl Chloride (PVC)

Exposure to heat often causes PVC geomembranes to lose part of their plasticizers. This causes the geomembrane to lose some of its flexibility, to varying degrees, depending on the plasticizers used.

Products treated with ultra violet radiation during manufacture exhibit relatively good resistance to sunlight.

Long term performance in contact with saline or acid solutions and hydrocarbons is satisfactory, although some deterioration in chemical and mechanical properties has been reported.

2.3.2.3. Polyéthylène haute densité (PEHD)

Ce polymère est remarquablement stable chimiquement face aux sollicitations de la chaleur, des rayons UV et des produits chimiques. Une certaine rigidité et un important coefficient de dilatation thermique handicapent toutefois les géomembranes en PEHD (tendance à se plisser).

2.3.2.4. Polyéthylène chlorosulfoné (PECS)

Sur le plan du vieillissement, le PECS communément appelé hypalon, présente les mêmes garanties que le PEHD, mais les réparations deviennent difficiles dans le temps.

2.3.2.5. Polyéthylène chloré (CPE)

Le CPE a une bonne stabilité chimique face aux effets de la chaleur, des ultra-violets et de certains produits chimiques. Une certaine absorption d'eau se produit à haute température.

2.3.2.6. Butyl

Le caoutchouc butyl est détérioré lentement par l'ozone, ce phénomène s'accroissant aux endroits sous tension.

Des échantillons de géomembranes en butyl ont été prélevés après 10 ans de service dans des ouvrages réels. Une rigidification a été constatée, accentuée aux parties exposées aux intempéries.

Le butyl est par ailleurs très sensible aux hydrocarbures, même présents en faible quantité sous forme de film à la surface de l'eau.

2.3.3. Conclusions sur le vieillissement

Le vieillissement des géomembranes peut actuellement être appréhendé par des données d'études en laboratoire (tests accélérés). Par ailleurs, le suivi d'ouvrages réels apporte des renseignements particulièrement significatifs.

L'existence d'ouvrages étanchés par des géomembranes et construits depuis plus de 10 ans, certains depuis plus de 20 ans, est une garantie de bon comportement de ces matériaux pendant des durées analogues si on les emploie dans des conditions équivalentes. Ainsi, certaines parties de l'étanchéité amont en limons du barrage Terzaghi achevé en 1960 ont été, dès l'origine, recouvertes par une géomembrane PVC pour assurer un complément d'étanchéité ainsi qu'une répartition de la pression hydrostatique sur les limons.

Il est intéressant de noter en outre que, dans certains pays, des géomembranes mises en place sans protection depuis plus de 20 ans sur des barrages en remblai, ou pour réhabiliter des barrages en maçonnerie ou en béton, continuent à donner satisfaction.

Enfin des progrès importants ont été faits par les fabricants quant à la durabilité des produits.

De même, des étanchéités de canaux par membrane PVC enterrée se sont révélées satisfaisantes au bout de 10 ans. Des essais sur une membrane CPE enterrée

2.3.2.3. *High Density Polyethylene (HDPE)*

This polymer exhibits remarkable chemical stability when exposed to heat, ultra violet radiation and chemicals. A certain degree of stiffness and a high coefficient of thermal expansion do however handicap HDPE geomembranes, which tend to wrinkle.

2.3.2.4. *Chlorosulphonated Polyethylene (CSPE)*

CSPE, commonly called Hypalon, offers the same performance as regards ageing as HDPE but repairs become more difficult with the passage of time.

2.3.2.5. *Chlorinated Polyethylene (CPE)*

CPE has good chemical stability to heat, ultra violet radiation and some chemicals. There is some tendency to absorb water at higher temperatures.

2.3.2.6. *Butyl Rubber*

Butyl rubber gradually perishes from ozone exposure, and the process is faster under stress.

Samples of butyl rubber geomembrane taken from operational dams after they had been in place for ten years exhibited signs of rigidification which was greater in parts exposed to the weather.

Butyl rubber is highly sensitive to hydrocarbons, even small quantities floating as a film on top of the water.

2.3.3. **Conclusions on Ageing**

We now have a good insight into geomembrane ageing from laboratory research data (accelerated ageing test). Monitoring of operational dams also provides very meaningful information.

The fact that there are dams using geomembranes for watertightness, built more than ten, and in some cases, more than twenty years ago is an assurance that these materials will perform satisfactorily over similar lengths of time if they are employed in the same way. Some of the upstream impervious silts used on the Terzaghi dam, completed in 1960, were covered with a geomembrane to make the system completely watertight and to distribute the hydrostatic pressure more evenly over the silt layer. It is also interesting to note that, in some countries, geomembranes laid without protection more than ten years ago on embankment dams or as repairs to concrete and masonry dams are still giving satisfaction.

Lastly, major advances have been made by manufacturers as regards the durability of their products.

Satisfactory long term performance of buried PVC for canal lining has been experienced with installations over twenty years. Tests on the buried CPE lining of

du réservoir Mount Elbert Forebay (USA) ont montré un bon comportement au bout de 9 ans.

L'exemple connu le plus ancien d'utilisation d'une géomembrane sur un barrage en remblai est celui du barrage en enrochement de Contrada Sabetta (Italie), haut de 32 m où une membrane en polyisobutylène protégée par des dalles en béton donne satisfaction depuis 1959.

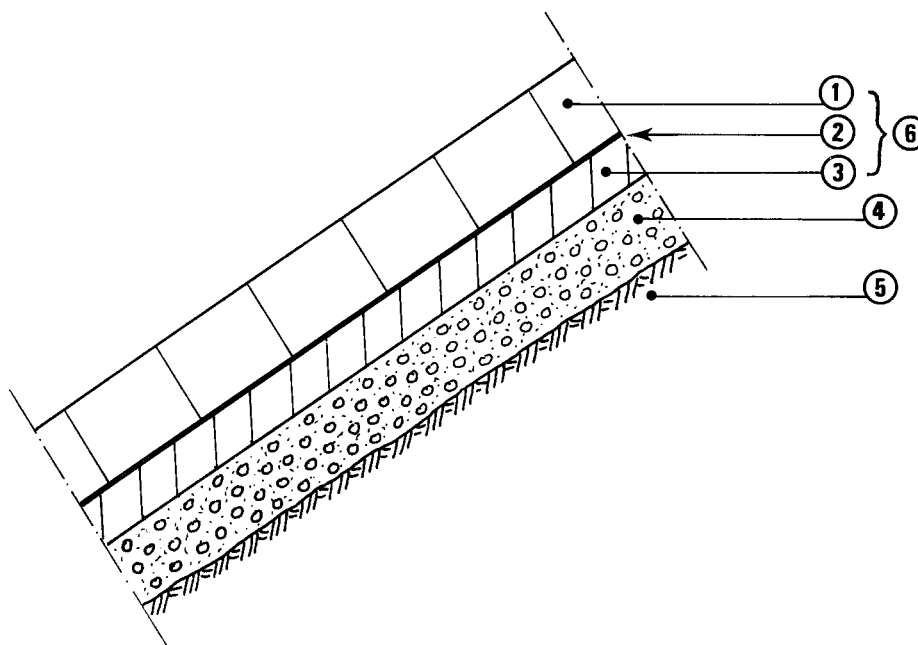
the Mt Elbert Forebay structure have shown that the lining continues to perform well after nine years.

The oldest example of the use of geomembranes on an embankment dam is the use of polyisobutylene protected by concrete slabs on Contrada Sabetta dam. This system has been performing satisfactorily since 1959.

3. CONSTITUTION DU DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ ET SOLLICITATIONS AUXQUELLES IL EST SOUMIS

3.1. Constitution du dispositif d'étanchéité

Le dispositif d'étanchéité est formé de couches superposées. Certaines constituées de matériaux tels que terre, béton, enrochements, etc. sont épaisses; d'autres constituées de matériaux synthétiques ou bitumineux sont minces. Ces différentes couches ont des rôles soit de support, soit d'étanchéité, soit de protection de l'étanchéité, ou plusieurs de ces rôles, simultanément.



On peut schématiser l'ensemble barrage-étanchéité par superposition des éléments suivants (voir Fig. 8) :

- une couche de forme assurant la transition entre le corps de barrage et le dispositif d'étanchéité;
- le dispositif d'étanchéité proprement dit comprenant :
 - une couche support pouvant jouer un rôle hydraulique (filtre et drain) et mécanique (répartition des efforts);
 - une géomembrane destinée à assurer l'étanchéité;

3. COMPOSITION OF, AND LOADS APPLIED TO GEOMEMBRANE-BASED FACINGS

3.1. Composition

Watertight facings to dams based on the use of a geomembrane are composite, layered systems comprising thick layers of earth, concrete, rockfill, etc., and a thin layer of synthetic or bituminous material. These layers provide support, watertightness and/or protection.

Fig. 8

Watertight Facing System.

Éléments constitutifs de l'étanchéité.

- | | |
|------------------------|-------------------------------------|
| (1) Protective Layer. | (1) <i>Couche de protection.</i> |
| (2) Geomembrane. | (2) <i>Géomembrane.</i> |
| (3) Supporting Layer. | (3) <i>Couche support.</i> |
| (4) Base Layer. | (4) <i>Couche de forme.</i> |
| (5) Dam Body. | (5) <i>Corps de barrage.</i> |
| (6) Watertight Facing. | (6) <i>Dispositif d'étanchéité.</i> |

The system may be described schematically as follows (Fig. 8) :

- Base layer, forming the transition from the material in the main body of the dam to the watertight system;
- Watertight facing proper, comprising :
 - supporting layer, which may act as a filter and drain for seepage control, and/or a stress distribution material;
 - geomembrane, for watertightness;

- une couche de protection de la géomembrane constituée généralement de cailloux ou enrochements, ou bien de matériaux préfabriqués (blocs ou dalles de béton) ou quelquefois encore de terre.

Pour des retenues de petite dimension ne présentant pas de risques pour l'aval ou bien lorsqu'il existe une deuxième étanchéité, les géomembranes pourront ne pas être protégées.

Dans certains cas, l'étanchéité pourra comporter deux géomembranes, avec une couche intermédiaire généralement drainante (système de double étanchéité).

On considère généralement que la réalisation de la couche de forme relève du lot terrassement et que celle de la couche support relève du lot étanchéité.

Le dispositif d'étanchéité et plus spécialement la géomembrane sont soumis à différentes sollicitations.

Nous distinguerons les sollicitations mécaniques et les sollicitations physico-chimiques ou biologiques. Les sollicitations mécaniques s'analysent en terme d'effort et sont dues au plan d'eau et au barrage lui-même (pression hydrostatique, déformations...). Les sollicitations physico-chimiques et biologiques sont des actions sur la matière constitutive de la géomembrane.

3.2. SOLLICITATIONS MÉCANIQUES

Les géomembranes sont soumises à un ensemble de sollicitations mécaniques, soit pendant leur pose ou celle de leur protection, soit pendant la durée de vie du barrage. On peut distinguer des efforts de traction dus à des glissements ou à des déformations différentielles du support ou bien au mode de mise en œuvre et des sollicitations au poinçonnement. La pression hydrostatique intervient dans ces deux types de sollicitations. Toute mesure propre à réduire les tensions après pose de la membrane devra être prise en raison du risque de vieillissement accéléré sous contraintes (caoutchouc butyl et polyéthylène chloré CPE en particulier).

3.2.1. Glissement

Le dispositif d'étanchéité comporte au moins une couche mince : la géomembrane. Il peut y avoir d'autres couches minces associées telles que des géotextiles. Il peut aussi y avoir deux géomembranes. Ces couches minces sont considérées comme des structures bi-dimensionnelles caractérisées par :

- une raideur à la flexion négligeable;
- une relation contrainte-déformation dans le plan de la couche, généralement non linéaire, non isotrope et fonction du temps (fluage);
- une relation contrainte-déformation à chaque interface fonction :
 - de la nature des matériaux en contact,
 - de leur teneur en eau,
 - éventuellement du temps.

Les autres constituants du dispositif d'étanchéité interviennent par leurs caractéristiques mécaniques, telles que définies habituellement en géotechnique.

L'étude des déformations du dispositif d'étanchéité peut, la plupart du temps, être conduite en négligeant la résistance à la traction des couches minces. En revanche, la tenue au glissement à leur surface affecte le comportement général du système, car les couches minces peuvent constituer une surface de glissement préférentiel, critique pour la stabilité du système.

- protective layer over the geomembrane, usually stone or rock, prefabricated concrete blocks or slabs, or earth.

The protective layer may be omitted from small dams with no risk to downstream life or property, or where there is a second watertight component in the structure.

The watertight system may comprise two geomembranes with, between them, a layer of usually free-draining material.

Construction of the base layer is usually considered as being the job of the main contractor, while the supporting layer is included in the facing contract.

The facing system in general and the geomembrane in particular must withstand mechanical loads and physical, chemical and biological attack.

Mechanical loads are associated with the reservoir and the dam itself (hydrostatic pressure, dam deformations, ice, etc.). Physical, chemical and biological attack concerns substances and organisms affecting the material of which the geomembrane is made.

3.2. MECHANICAL LOADS

Geomembranes are subjected to loads while they are being laid and covered with their protective layer, and subsequently, over the lifespan of the dam. A distinction can be made between (i) tensile loads due to sliding, differential deformation of the supporting layer and design details in the way the geomembrane is installed, and (ii) concentrated loads causing punctures. Hydrostatic pressure is involved in both types. Every effort should be made to prevent the geomembrane being stretched in laying, because of the danger of accelerated stress ageing for butyl rubber and CPE in particular.

3.2.1. Sliding

The facing system comprises at least one thin layer — the geomembrane. There may be others, such as a geotextile layer, or a second membrane. These thin layers are considered as two-dimensional structures characterised by their :

- negligible resistance to bending;
- stress strain properties in the plane of the layer, which are usually non linear, anisotropic and time-dependent (creep);
- a stress strain relationship at each interface which is governed by :
 - composition of the materials in contact with each other;
 - moisture content;
 - the time factor in some cases.

The other components in the facing system are relevant in terms of their mechanical properties in the usual geotechnical sense.

The deformations of the facing system can usually be analysed without needing to consider the tensile strength of the thin layers. On the other hand, their surface shear resistance affects the overall performance of the system because the thin layers may act as preferential slip surfaces liable to be critical for the stability of the system.

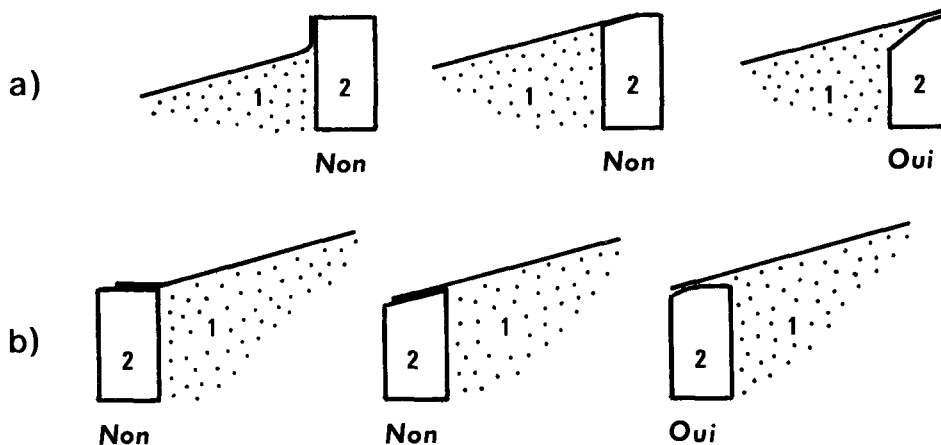
Il convient donc de vérifier la tenue au glissement à chaque interface : entre 2 couches minces juxtaposées, entre couche support et membrane, entre membrane et couche de protection... En cas de glissement à l'une de ces interfaces, il y a risque de déchirure des couches minces, en particulier de la géomembrane.

3.2.2. Déformation différentielle du support

Les déformations différentielles du support intéressent en particulier :

- les zones de raccordement avec les rives ou la fondation au cas où celles-ci seraient plus compressibles ou plus rigides que le remblai;
- en rive, les zones à variation brutale de pente du terrain;
- le voisinage des structures en béton;
- la zone d'ancrage éventuel des couches minces en crête de barrage.

Dans le cas de raccordement avec un ouvrage en béton, on évitera d'avoir à se raccorder sur une partie verticale. Sur des parois inclinées, le remblai, en tassant, s'appuiera sur le béton favorisant ainsi la transition entre le remblai déformable et le béton rigide (voir Fig. 9).



La mise en place de plis (ou lyres) n'est pas toujours suffisamment efficace, ces plis pouvant se déplacer sur la pente, ou au contraire ne pas remplir leur rôle étant comprimés par la couche de protection et la pression hydrostatique.

3.2.3. Perforation et poinçonnement

La perforation peut se produire à trois étapes différentes :

- pendant la pose de la géomembrane : déplacements d'ouvriers, chutes d'outils, remblaiement de la tranchée d'ancrage, engins;
- pendant la mise en œuvre de la protection ou la construction d'ouvrages en béton;

Stability against sliding must be checked at every interface between two adjacent thin layers, between the supporting layer and the geomembrane, between the geomembrane and the protective layer, etc. If sliding occurs on any interface, there is a risk of the thin layers, especially the geomembrane, being torn.

3.2.2. Subgrade Differential Deformation

Differential deformation of the subgrade concerns chiefly :

- abutment and foundation interfaces if the in-place material is more compressible or stiffer than the dam fill;
- sudden changes in the slope of the abutment at the foot of the valley flanks;
- interfaces with concrete structures;
- areas at the top of the dam where the thin layers may be anchored in the fill.

At junctions with concrete structures, connections should not be made on vertical faces. An inclined face will cause the fill to compact against the concrete as it settles, providing a smoother transition between the deformable fill and the rigid concrete (Fig. 9).

Fig. 9

Connection to Rigid Structures.

Exemples de raccordement à un ouvrage rigide.

- | | |
|----------------------------|--|
| (a) At top of membrane. | (a) <i>Raccordement à un ouvrage haut.</i> |
| (b) At bottom of membrane. | (b) <i>Raccordement à un ouvrage bas.</i> |
| (1) Embankment. | (1) <i>Remblai.</i> |
| (2) Concrete. | (2) <i>Béton.</i> |

Leaving spare folds in the geomembrane is not always an effective practice since the folds may move down the slope or may be prevented from releasing the necessary slack by the weight of the overlying protective layer or the hydrostatic pressure.

3.2.3. Punctures

Punctures from sharp edges or falling objects can occur at three different times in the life of the structure :

- while installing the geomembrane, by being walked over by the workmen, from dropped tools, while backfilling the edge trench, or by constructional plant;
- while placing the protective layer or building concrete structures;

— pendant la vie du barrage, la pression de l'eau plaquant la géomembrane contre les éléments anguleux de la couche support ou bien à l'occasion de travaux d'entretien.

Pour éviter ce dernier risque, il faut traiter le support pour éviter tout point anguleux : utilisation de sable, d'un géotextile anti-poinçonnement. En l'absence d'un géotextile, la réception du support avant mise en place de la géomembrane est à faire avec le plus grand soin. Ceci n'exclut pas que des cailloux apparaissent ensuite, le support pouvant être érodé par des circulations d'eau sous la membrane.

Contre les risques de poinçonnement en cours de chantier, la mise en place d'un géotextile est très souhaitable pour éviter les chocs avec les matériaux (blocs ou pierres de protection) ou pour permettre la circulation des personnels. Ce géotextile peut aussi diminuer le risque de glissement de la protection.

Sauf justification particulière du fournisseur, un engin mécanique ne doit pas circuler directement sur la géomembrane. Un engin à chenille pourrait circuler sur un matelas de protection de l'ordre de 30 cm (sol sans cailloux, sable...). Un engin à roue devrait *a priori* être proscrit.

3.2.4. Tensions à la mise en place

Des tensions peuvent résulter :

- du mode de mise en place (compactage, déversement) des matériaux de protection;
- de l'action de la pesanteur agissant sur la géomembrane. Cette action peut intervenir lors de la pose du revêtement, avant son recouvrement, en particulier lorsque, sous l'effet du vent, il se développe un mouvement de « reptation » du revêtement vers le pied de talus.

Le remède peut consister à utiliser une géomembrane renforcée ou collée à un géotextile, ceci se faisant au détriment de la capacité d'élongation à la rupture.

3.2.5. Chocs

On a déjà cité les risques de poinçonnements, accrocs, déchirures en cours de chantier par le personnel et le matériel, au moment des manutentions, de la pose et du recouvrement du système d'étanchéité. La mise en œuvre d'un géotextile sous et sur la membrane est souvent préconisée. Des membranes composées associées à un géotextile (en usine) peuvent, selon les matériaux, présenter un certain intérêt tout en empêchant les glissements et en accélérant la mise en place. Après la mise en eau, des chocs divers peuvent résulter de corps flottants, de passages d'animaux, d'actes de vandalisme. Une couche de protection convenable permet généralement de remédier à ces inconvénients. Une surveillance de l'ouvrage est toutefois nécessaire pour s'assurer de la pérennité de la protection notamment sur les sites ouverts au public.

3.2.6. Vent

Le vent crée des dépressions susceptibles de soulever la géomembrane. Ce risque est bien sûr prépondérant pendant la mise en place, et avant pose de la protection éventuelle. Les difficultés de mise en œuvre et les dégradations de membranes soulevées par le vent peuvent constituer une difficulté majeure dans certains sites particulièrement soumis à des vents violents.

— after the dam has become operational, by water pressure forcing the membrane against sharp particles in the supporting layer, or from damage occurring during maintenance works.

Damage from sharp and subangular particles in the supporting layer can be avoided by using sand or a protective geotextile underlay. If there is no underlay, the supporting layer must be inspected with the closest attention before allowing the geomembrane to be laid on it. This is no guarantee that stones will not subsequently come into contact with it if the supporting layer is eroded by seepage under the geomembrane.

To avoid damage during the construction period, a geotextile overlay is very useful to protect against impacts from protective blocks or stone and foot traffic. The geotextile may also help prevent the geomembrane from sliding down the slope.

Except if specifically permitted by the manufacturer, vehicles and plant should not circulate directly on the geomembrane. Tracked vehicles may run on a protective layer of 30 cm of stone-free soil, sand, etc. Wheeled vehicles should not normally be allowed.

3.2.4. Stretching

Tensile stresses in the geomembrane may be produced by :

— the action of dumping and compacting the protective layer;

— gravity effects on the geomembrane, when it is being laid and before it is covered, especially through a downslope reptation caused by wind.

The remedy may be to use a reinforced geomembrane or a geomembrane bonded to a geotextile, although at the cost of a loss of elongation at failure.

3.2.5. Impact

Mention has already been made of the danger of punctures, snags and tears caused by workmen and constructional equipment while the geomembrane is being moved, laid and covered. The use of geotextile over- and underlays is often recommended. Factory-made geomembrane/geotextile composites may be attractive if the constituent materials are suitable, by preventing sliding and allowing installation to proceed more quickly. When the reservoir is filled, the facing may be exposed to impact from floating debris, wildlife and vandalism. An appropriate protective layer usually overcomes these problems. Inspection is still however necessary to monitor the integrity of the protection, especially if the site is accessible to the public.

3.2.6. Wind

Wind may suck up the geomembrane. The greatest danger is of course while it is being laid before the protective layer (if any) is placed. Laying the membrane and preventing damage may become a major problem at windy locations.

Pour y remédier on a recours à des tests (terre, pneumatiques usagés, pierres, béton) ou à un ancrage en tête même provisoire.

Lorsqu'une géomembrane n'est pas protégée, un calcul de soulèvement au vent doit être fait. Pour les parements d'une certaine surface, cela peut conduire à prévoir des lests définitifs, en plus de l'ancrage périmétral.

Le tableau ci-après donne, à titre indicatif, la valeur de la dépression maximale P obtenue sur une surface plane, en fonction de la vitesse V du vent :

V (km/h)	20	40	60	80	100	140	180
P (Pa)	20	80	170	310	480	920	1 520

3.2.7. Actions de la retenue : vagues, glace

Les vagues peuvent déformer de manière répétée une géomembrane non revêtue et lui faire perdre certaines de ses qualités par fatigue. Elles peuvent aussi déplacer la protection et même la couche support.

La glace peut mettre en tension les parties de membrane en contact avec le plan d'eau. L'insufflation d'air comprimé près de la membrane peut dans certains cas permettre d'éviter ce risque.

3.2.8. Sous-pression d'eau ou de gaz

Des sous-pressions d'eau peuvent se produire lors d'une vidange rapide, si le massif aval est saturé pour une raison quelconque (barrage avec niveau aval élevé, fuites...). Ces sous-pressions provoquent des tensions de la membrane avec apparition de cloques. Il convient donc de prévoir un drainage efficace sous la membrane.

Dans le cas où la membrane se prolonge horizontalement en tapis sous le réservoir, des formations de poches d'air ou de gaz peuvent résulter de la décomposition de matières organiques ou de la variation du niveau phréatique. Dans ce cas, il est nécessaire de prévoir un drainage séparé des gaz, avec évacuation vers les points hauts.

3.2.9. Dilatation

La plupart des membranes ont un coefficient de dilatation faible. Le PEHD fait exception. Les membranes en PEHD non protégées sont donc alternativement tendues et détendues dans les régions chaudes, ce qui peut provoquer des ondulations et des tractions sur les joints. Ce problème est surtout préoccupant pour les barrages périodiquement vidangés où le plan d'eau n'assure pas une protection thermique suffisante.

3.3. ACTIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES

3.3.1. Chaleur

Les caractéristiques mécaniques des membranes varient avec la température (élongation plus forte et module d'élasticité plus faible lorsque la température s'élève).

The geomembrane should be weighted down with earth, old tyres, cobbles or concrete and anchored, even temporarily, at the top edge.

Unprotected geomembranes should be analysed to examine the effect of wind lifting them. If the area is of any size, permanent weighting may be necessary in addition to the anchorage around the perimeter.

The following Table illustrates the maximum negative pressure P on a flat surface versus windspeed V.

V (km/h)	20	40	60	80	100	140	180
P (Pa)	20	80	170	310	480	920	1 520

3.2.7. Reservoir Waves and Ice

Wave action may repeatedly deform an unprotected geomembrane with fatigue effects on certain properties. Waves may also move the protection and even the supporting material.

Floating ice may tension the parts of the membrane in contact with the reservoir. The risk can sometimes be avoided by a bubbler system blowing compressed air near or along the face of the geomembrane.

3.2.8. Uplift from Water or Gas

Uplift may develop from seepage during rapid drawdown conditions if the underlying dam material is saturated for any reason (high tailwater level, leakage, etc.). These pressures will tension the geomembrane and form blisters. Proper drainage must therefore be provided under the geomembrane.

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

3.2.9. Expansion

Most geomembranes have a low coefficient of thermal expansion, except for high density polyethylene. Unprotected HDPE geomembranes are therefore alternately stretched and slackened in hot climates, possibly causing ripples and tensile stresses at seams. The problem is of special concern at dams which are periodically drawn down so that the reservoir does not provide a sufficient thermal barrier.

3.3. PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL ATTACK

3.3.1. Heat

The mechanical properties of geomembranes vary with temperature (higher elongation and lower modulus of elasticity at higher temperatures).

Ce point est à prendre en considération pour le choix du matériau selon les conditions d'exposition du site.

3.3.2. Action des rayons ultra-violet (UV)

La possibilité de dégradation par les rayons UV peut être limitée par une constitution appropriée de la membrane. Elle peut en outre ne concerner qu'une période limitée, par mise en œuvre rapide d'une couche de protection.

3.3.3. Action de l'eau

La nécessité de s'assurer de la compatibilité des polluants accidentels tels que les hydrocarbures et des matériaux du système d'étanchéité est signalée pour mémoire. Ceci vaut aussi pour les collages. Il est important de tester la sensibilité des colles à des pollutions accidentelles, par les hydrocarbures par exemple.

3.3.4. Action biologique (micro-organismes).

Cette possibilité d'action doit être toujours examinée. Les micro-organismes en cause peuvent en effet préexister dans les remblais et terrains de fondation, ou se développer dans l'eau de la retenue.

3.3.5. Végétation

On doit toujours éviter que la géomembrane repose sur de la terre contenant des racines. Si un traitement biocide de surface est envisagé, il faut vérifier sa compatibilité chimique avec la géomembrane.

3.3.6. Rongeurs

A notre connaissance, les rongeurs se sont rarement attaqués à une géomembrane étanchant un ouvrage hydraulique. En fait, un rongeur ne s'attaque à une membrane que s'il est piégé ou si la membrane recouvre de la nourriture.

3.4. RÔLE D'UNE COUCHE DE PROTECTION VIS-A-VIS DES SOLlicitATIONS

Une structure de protection de la géomembrane la protège :

- complètement :
 - des risques de chocs après mise en eau;
 - du risque de soulèvement au vent;
 - de l'action des rayons ultra-violet;
 - du phénomène de fatigue provoqués par des soulèvements répétés dus à l'action du vent ou des vagues;
 - du vandalisme;
 - de la circulation des animaux;
- partiellement :
 - de l'effet des faibles sous-pressions éventuelles;

This must be considered when choosing materials to suit specific site conditions.

3.3.2. Ultra Violet Radiation

Ultra violet damage can be lessened by proper geomembrane formulation. The danger period can be shortened by prompt placement of the protective layer.

3.3.3. Water

The need to ensure compatibility between the facing system materials and accidental pollutants like hydrocarbons is a minor point, but one which also concerns adhesive-type seams. It is important to test solvents and adhesives for sensitivity to accidental contaminants like hydrocarbons.

3.3.4. Biological Action (Micro-organisms)

This possibility should always be examined. Potentially aggressive micro-organisms may pre-exist in the fill and foundation or develop in the reservoir.

3.3.5. Vegetation

Geomembranes should never be laid on soil containing plant roots. If biocide treatment of the area is being considered, its compatibility with the geomembrane chemistry should be checked.

3.3.6. Rodents

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

3.4. PURPOSE OF PROTECTIVE LAYER

The protective system to a geomembrane protects it :

- completely against :
 - impact damage after impounding;
 - wind suction;
 - ultra violet radiation;
 - fatigue damage from repetitive lifting by wind and waves;

- willful damage;
- animal passage;
- and partially against :
 - low uplift pressures;

- du risque d'ondulation sous l'effet de la dilatation;
- des effets de la chaleur sur les caractéristiques mécaniques;
- de l'effet de la glace.

A contrario, la présence d'une couche de protection peut avoir un rôle défavorable sous certains aspects :

- risque de perforation ou de poinçonnement à la pose;
- risque de déchirure en cas de glissement de la protection sur la membrane;
- nécessité d'enlever la protection pour inspecter et réparer la géomembrane.

- wrinkling due to thermal expansion;
- deterioration of mechanical properties by heat, and;
- ice damage.

On the other hand, a protective layer can have detrimental aspects in the :

- risk of punctures while it is being laid;
- risk of tearing the geomembrane if it slides over it, and;
- need to remove the layer to inspect and repair the geomembrane.

4. RECOMMANDATIONS POUR L'EMPLOI DES GÉOMEMBRANES DANS LES BARRAGES EN REMBLAI

4.1. CONCEPTION DU CORPS DE BARRAGE

La conception du corps du barrage en terre ou en enrochement comporte certains aspects spécifiques lorsque l'étanchéité est assurée par une géomembrane.

4.1.1. Stabilité du talus amont du remblai

La stabilité du talus amont doit être assurée dans les cas classiquement considérés :

- stabilité à court terme;
- stabilité à long terme, retenue pleine;
- stabilité en vidange rapide.

Dans ce dernier cas, il faut envisager la possibilité d'une défaillance de la géomembrane. Il faut donc prendre en compte l'hypothèse d'un matériau saturé au voisinage de la géomembrane, l'ampleur de la zone saturée étant fonction de la perméabilité du remblai.

Dans le choix des pentes, il faut aussi prendre en compte la nature des matériaux constitutifs de l'ouvrage à revêtir et le type de revêtement. En particulier, la stabilité de la couche de protection posée sur la géomembrane devra être vérifiée dans le cas de la vidange rapide si elle est non drainante et en tenant compte de l'effet de batillage.

Une pente de 1/1,5 (hauteur/base) doit être considérée comme un maximum. Les inclinaisons plus fortes, même si elles sont techniquement possibles et répondent aux conditions de stabilité de l'ouvrage, compliquent les travaux préparatoires, la pose et la protection des géomembranes et augmentent les coûts unitaires.

On peut, à titre indicatif, conseiller les valeurs moyennes suivantes, selon la nature du support :

- terres argileuses : 1 pour 2,5 à 3,5;
- terres sablo-argileuses ou limoneuses : 1 pour 2 à 3;
- terres sableuses ou graveleuses : 1 pour 2 à 2,5;
- enrochements : 1 pour 1,5 à 2.

On rappelle qu'un bouteur ne peut circuler sur une pente plus raide que 1/2 et que la circulation des engins est facile pour une pente de 1/3.

Enfin, bien entendu, la pente du parement amont du barrage doit être compatible avec l'angle de frottement géomembrane-matériau de la couche support (voir 3.2.1.).

4. RECOMMENDATIONS ON USE OF GEOMEMBRANES IN FILL DAMS

4.1. DAM DESIGN

Earth and rockfill dam design displays some special features if a geomembrane system is to be used for watertightness.

4.1.1. Upstream Face Stability

- The upstream dam slope stability must be analysed for the standard conditions :
- short term stability;
 - long term stability with full reservoir;
 - rapid drawdown conditions.

Geomembrane defects must be considered in the rapid drawdown analyses with the material directly underneath assumed to be saturated. The depth of the saturated zone will be governed by the permeability of the fill.

When setting the dam slopes, the designer must also consider the composition of the constructional material and type of facing. He must in particular check the stability of the protective layer overlying the geomembrane during rapid drawdown if it is not free-draining, with due allowance for wave effects.

A face slope of 1/1.5 (vertical/horizontal) must be considered an upper limit. Steeper slopes, even if technically feasible in terms of dam stability, complicate preparatory works, the laying of the geomembrane and protective layer, and push up unit costs.

A general guide to average values for face slopes for different underlying materials might be as follows :

- clay : 1 vertical for 2.5 to 3.5 horizontal;
- sand-clay and silt : 1/2-3;
- sand and gravel : 1/2-2.5;
- rockfill : 1/1.5-2.

Remember that a bulldozer cannot work on a slope steeper than 1/2 and that convenient operation of general constructional plant needs a slope of 1/3.

Lastly, of course, the face slope must be compatible with the geomembrane/supporting material friction angle (3.2.1. above).

4.1.2. Problème des discontinuités

La compatibilité des déformations du corps du barrage et du revêtement mince d'étanchéité doit être étudiée notamment au voisinage des singularités : variations brutales dans les caractéristiques ou la forme des terrains d'appui, ouvrages de prise ou de vidange constitués de matériaux plus raides, fondés différemment.

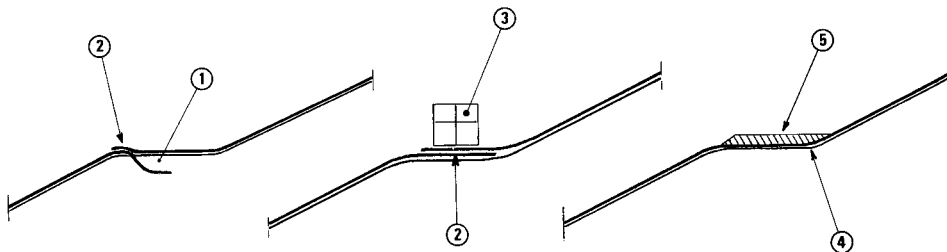
Des dispositions particulières sont à prendre au voisinage des points singuliers. Le cas d'un déversoir en puits posé sur le parement est par exemple délicat et on préférera si possible fonder cet ouvrage sur l'une des rives.

4.1.3. Géométrie du parement amont

La couche-support d'une géomembrane doit être plane pour faciliter le travail et éviter les points faibles dans les discontinuités ou les plis dans les raccordements de lés.

Il est donc important d'adopter, dans le cas d'une étanchéité par géomembrane, un axe de barrage rectiligne ou à courbure faible. En particulier un axe présentant un angle rentrant entraînerait des déformations permanentes (effet dit de la peau de tambour).

En ce qui concerne le profil en travers du parement amont, on évitera également les changements de pente. Il est néanmoins possible d'envisager l'exécution de risbermes. Elles facilitent certaines phases de chantier pour les déplacements d'engins en particulier. Leur présence est toutefois à l'origine d'un angle rentrant et peut nécessiter un ancrage supplémentaire (voir Fig. 10).



4.1.4. Drainage du remblai

L'étanchéité de la géomembrane pouvant être mise en défaut en cas d'incident, un drainage du remblai est indispensable, sauf pour les barrages en enrochement, le corps du barrage étant alors drainant.

Deux cas sont à considérer selon la nature du matériau de remblai.

4.1.2. Discontinuities

Compatibility of deformations between the body of the dam and the facing must be investigated, especially near singularities, e.g. sudden changes in characteristics or shape near abutments, or intake and outlet structures built of stiffer materials on different foundations.

Special measures are required near singularities. A tower spillway buried in the upstream dam face is an arduous problem for example, and a better alternative, if possible, would be a structure sitting on the abutment.

4.1.3. Upstream Face Geometry

The geomembrane supporting layer must be flat to make the installation work easier and prevent weak points at discontinuities or wrinkles at the seams.

A dam with a geomembrane-based facing should always be straight or only slightly curved. A dam with re-entrant angles would cause permanent deformations (sometimes referred to as the drum-skin effect).

There should be no changes in the face slope seen in cross section, although berms are acceptable, since they are useful at some stages of construction, notably for the passage of constructional plant. Their inner edges do however make a re-entrant angle with the main face and may make extra anchorages necessary (Fig. 10).

Fig. 10

Method of Negotiating Berms on Dam Face.

Cas d'un parement amont avec risberme.

- | | |
|---|--|
| (1) Top Anchorage. | (1) <i>Ancrage.</i> |
| (2) Seam. | (2) <i>Joint.</i> |
| (3) Weight. | (3) <i>Lest.</i> |
| (4) No seam on smooth curve. | (4) <i>Angle arrondi, pas de joint.</i> |
| (5) Access ramp into reservoir (for example). | (5) <i>Rampe d'accès au réservoir (par exemple).</i> |

4.1.4. Dam Fill Drainage

As there is always a risk of the geomembrane leaking after an accident, it is essential to provide underdrainage (except on free-draining rockfill dams).

Two situations arise, depending on the constituent material of the dam :

a) *Cas courant : barrage en matériau perméable*

Il est nécessaire de drainer sous la membrane pour éviter des sous-pressions pouvant l'endommager et même pour éviter des renards.

La couche support est donc réalisée en matériau drainant, avec évacuation des eaux drainées à l'aval (voir Fig. 11a et paragraphe 4.3.2.).

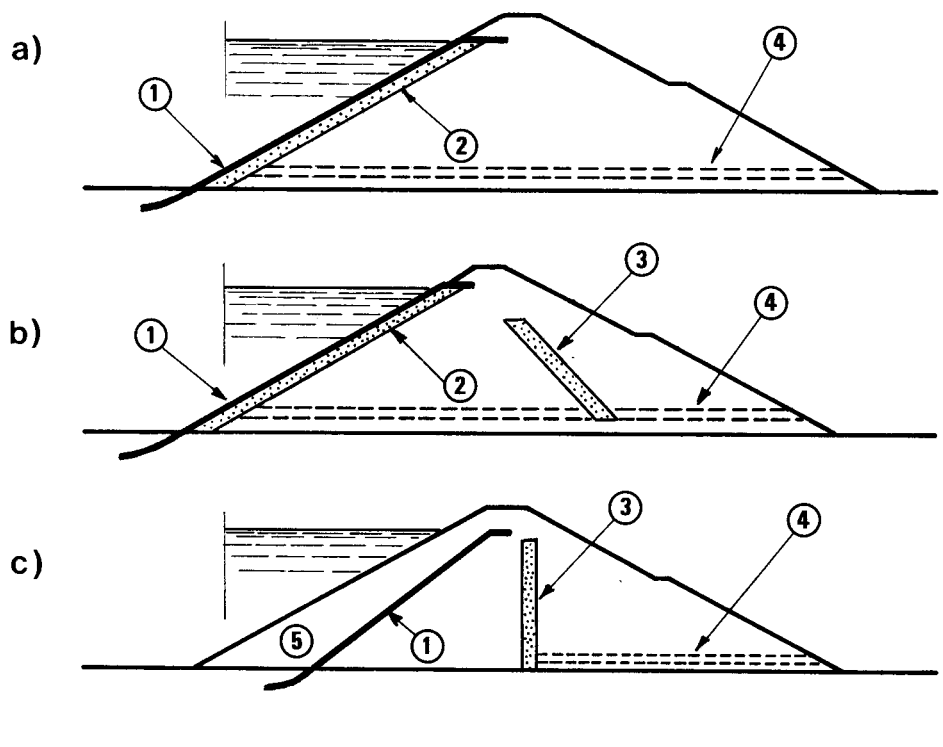
Si le barrage intéresse la sécurité publique, il faut en plus envisager le cas d'une déchirure importante de la géomembrane entraînant le dépassement de la capacité d'évacuation du drain. Un deuxième drain est alors nécessaire, conçu comme pour les barrages en terre homogène ou à noyau (voir Fig. 11b).

Ainsi, le barrage de Landstejn (voir Annexe 3) possède un double système de drainage.

C'est un problème d'appréciation du risque encouru. Pour un barrage de faible hauteur et si la réparation de fuites est possible, un drain aval est inutile. Par contre, pour un barrage de plus grande hauteur, et surtout si les réparations sont difficiles, un drain aval s'impose.

b) *Cas des matériaux semi-perméables*

Dans le cas d'un barrage constitué de matériaux semi-perméables, une géomembrane peut être choisie pour parfaire l'étanchéité du remblai. Il serait alors dommage de se priver de la relative étanchéité du remblai en plaçant un matériau drainant immédiatement sous la géomembrane. Dans ce cas, il peut être intéressant de ne pas drainer sous la membrane et de drainer le remblai pour tenir compte du



a) Pervious Materials

Drainage is needed under the geomembrane to prevent damage from uplift pressures and even piping.

The supporting layer therefore consists of a free-draining material discharging the water collected to the downstream side of the dam (Fig. 11a and paragraph 4.3.2. below).

If public safety is an important factor, the designer must also consider the possibility of a large tear exposing the drain layer to flow in excess of its normal capacity. This calls for a second drain, designed on the same basis as for a homogeneous earth dam or central core type (Fig. 11b).

Landstejn dam for example (Appendix 3) has a double drainage system.

It is a matter of properly assessing the risk. A second downstream drain is unnecessary for a small dam where leaks can be repaired, but for a large dam, a downstream drain is essential, especially if it would be difficult to make repairs.

b) Semi-pervious Materials

If a geomembrane is used to improve the watertightness of a dam built of semi-pervious materials, it would be wasteful to ignore the impervious qualities of the dam fill by placing an underdrain beneath the geomembrane. It would be better not to provide the geomembrane with a drain but drain the fill as a means of covering the possibility of membrane failure (Fig. 11c). The problem is one of protecting the

Fig. 11

Single and Double Drainage in Earth Dams.

Barrages en terre : simple drainage et double drainage.

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| (1) Geomembrane. | (1) <i>Géomembrane.</i> |
| (2) Geomembrane Underdrain. | (2) <i>Drain sous la géomembrane.</i> |
| (3) Chimney Drain in Dam Body. | (3) <i>Drain du remblai.</i> |
| (4) Finger Drain Outlet. | (4) <i>Exutoire.</i> |
| (5) Protecting and Weighting. | (5) <i>Protection et lest.</i> |

risque de rupture de la membrane (voir Fig. 11c). Le problème est alors de protéger la géomembrane contre les sous-pressions en cas de vidange du barrage. Une solution consiste à réaliser une couverture dont le poids compense les sous-pressions éventuelles.

4.2. COUCHE DE FORME

La couche de forme assure, avec la couche support, la transition entre le corps du barrage et la géomembrane. Sa nature dépend donc de celle des matériaux du corps de barrage. Deux cas sont à distinguer.

4.2.1. Barrages en enrochements

La forte perméabilité des enrochements n'impose à la couche de forme que le rôle de transition granulométrique entre le corps du barrage et le dispositif d'étanchéité. Elle est, en général, exécutée en deux opérations successives.

a) Une recharge en enrochements de taille réduite (80/150 mm par exemple) dépourvus de matériaux fins (filler, sable fin, limon...) d'une largeur de 2 à 4 m, compactée horizontalement.

La fourniture et la mise en œuvre de cette couche font partie normalement de l'exécution du corps de barrage.

b) Un reprofilage de cette recharge obtenu par un compactage le long du rampant et par un apport de 20 à 30 cm de gravillon 15/30 mm par exemple), puis de sable (1/6 par exemple).

4.2.2. Barrages en terre

Dans le cas des barrages en terre, le caractère plus ou moins perméable des matériaux meubles du corps de barrage impose que la couche support soit drainante. La couche de forme doit donc en tenir compte pour éviter la migration dans les drains des éléments fins du corps de barrage.

La préparation de la forme comportera les opérations suivantes :

a) exécution du remblai compacté avec une surlargeur horizontale du corps de barrage de 1 m environ (méthode du remblai excédentaire);

b) enlèvement de cette surlargeur et compactage sur rampant;

c) exécution d'un dispositif bloquant les fines du corps de barrage.

Deux solutions sont envisageables dans ce but :

— réalisation d'un filtre naturel conforme aux règles de granulométrie habituelles. Le remplacement d'un tel filtre par un géotextile est possible moyennant le respect des critères de filtre. Une attention toute particulière doit être portée au risque de colmatage par les fines du remblai;

— dans quelques cas exceptionnels, on peut employer une seconde membrane d'étanchéité, un matériau drainant étant placé entre les deux membranes.

Dans certains cas, la surlargeur peut être évitée lorsque l'on dispose d'un moyen de compactage selon le rampant (compacteur dynamique monté au bout du bras d'une pelle hydraulique par exemple).

geomembrane against uplift when the reservoir is drawn down. One solution is to bury it in material whose weight would counterbalance the uplift pressure.

4.2. BASE LAYER

Together with the supporting layer, the base layer provides the transition from the material in the body of the dam to the geomembrane. Its design will therefore be dependent on the constructional material in the dam, and two cases must be distinguished.

4.2.1. Rockfill Dams

Because a rockfill dam is highly pervious, the only requirement of the base layer is to provide the transition in grain size from the dam to the facing system. It is usually placed in two stages.

a) A layer of small (e.g. 80/150 mm) rockfill free from fines (filler, fine sand, silt, etc.) is laid and compacted horizontally to a depth of 2-4 m. The main dam contractor is usually responsible for supplying and spreading this layer.

b) The layer is smoothed by compacting up and down the slope and adding 20-30 cm of gravel (e. g. 15/30 mm), then sand (e.g. 1/6 mm).

4.2.2. Earth Dams

The more or less pervious materials used in earth dams means that the supporting layer must allow water to drain. The base layer must be designed accordingly to prevent fines from the dam body migrating into the drains.

Preparation of the base layer therefore involves the following operations :

a) Spread and roll an extra 1-metre thickness (measured horizontally) of earthfill as for the main body of the dam.

b) Remove the excess and compact up and down the slope.

c) Finish the surface by preventing migration of fines from the dam body. This may be done in one of two ways :

— Place a filter of natural material following the usual grading curve design rules. A geotextile can be substituted providing it offers the same filter performance. Special attention must be given to risks of clogging by fines from the earthfill.

— In exceptional cases, a second impervious membrane may be used with drain material sandwich between the two membranes.

It may not be necessary to place the extra dam thickness if means are available for compacting up and down the slope (e.g. dynamic compactor on the end of a hydraulic shovel boom).

4.3. COUCHE SUPPORT

4.3.1. Barrages en enrochement

La couche support posée sur la couche de forme décrite en 4.2.1. peut être constituée d'un matériau fin, stabilisé, complétant la transition granulométrique, par exemple : sable stabilisé au bitume ou au ciment, béton maigre, béton bitumineux poreux. Il est recommandé de compléter ce support par un géotextile sur lequel reposera directement la géomembrane.

La couche support peut être simplement composée d'un géotextile posé directement sur une couche de forme stabilisée en surface : dans ce cas, un géotextile épais et résistant au poinçonnement est souhaitable.

4.3.2. Barrages en terre

Dans le cas des barrages en terre, la couche support a généralement pour rôle le drainage de l'eau des fuites éventuelles dans le dispositif d'étanchéité, afin d'éviter les sous-pressions. Dans le cas général, ce drain est constitué de matériaux naturels dont la perméabilité doit être comprise entre 10^{-2} et 10^{-3} m/s environ. L'épaisseur choisie est fonction de la hauteur de l'ouvrage.

Ce drain est raccordé à un système collecteur conçu pour éviter tous risques de colmatage et de renard. Il est souhaitable de multiplier les exutoires afin de mieux localiser les fuites éventuelles.

Pour réaliser ce drain on peut conseiller l'emploi :

— de sable grossier ou d'un tout-venant de concassage, ne contenant ni limon, ni argile : la couche aura 15 cm d'épaisseur au moins et sera épandue et compactée sur le rampant,

— d'enrobés bitumineux ouverts et drainants en couche de 10 cm d'épaisseur au moins. On vérifiera leur compatibilité avec le revêtement d'étanchéité.

Selon l'agressivité de ce matériau drainant, il pourra être nécessaire de placer sur la recharge drainante un géotextile antipoinçonnement ou d'utiliser une géomembrane associée en usine à un géotextile. Le géotextile, en plus de son rôle de support antipoinçonnement, freine l'écoulement de l'eau, en cas d'incident localisé sur la membrane.

La capacité drainante sous la géomembrane peut être accrue par des drains perforés placés selon la ligne de pente et collectés au pied du parement amont.

L'ensemble drain naturel et géotextile antipoinçonnement peut dans certains cas être remplacé par un géotextile épais comportant une partie filtrante en surface et une partie drainante au centre. Il faudra veiller au non-colmatage par les fines du remblai (règles habituelles de filtre). Il faudra également vérifier que la capacité drainante de ce géotextile est suffisante en tenant compte des contraintes de compression qu'il aura à subir en service et du risque de fluage. Ce système, très facile de mise en œuvre, présente *a priori*, l'inconvénient d'une capacité drainante décroissante vers le bas du parement sous l'effet d'une pression hydrostatique croissante. Aussi, en l'état actuel des fabrications, convient-il de ne l'employer comme système de drainage unique que pour des barrages n'excédant pas 15 m de hauteur environ.

4.3. SUPPORTING LAYER

4.3.1. Rockfill Dams

The supporting layer placed on the base layer described in 4.2.1. above may consist of fine, stabilised material to complete the continuous grading, such as bitumen- or cement-stabilised sand, lean concrete, or no-fines bituminous concrete. It is recommended to add a geotextile immediately under the geomembrane.

The supporting layer may in fact consist simply of a geotextile laid directly on a base layer whose surface has been stabilised; a thick, strong material is desirable in this case.

4.3.2. Earth Dams

The purpose of the supporting layer in an earth dam design is to drain any leakage through the facing to prevent the build-up of uplift pressures. In most cases, the drain is made of natural materials whose permeability should be between 10^{-2} and 10^{-3} m/s. Layer thickness must be appropriate to dam height.

This drain discharges into a drainage system designed to prevent all risk of clogging or piping.

There should be an adequate number of separate outlets from the drain in order to help locate any leakage which may occur.

Recommended materials for the drain are :

- Coarse sand or crusher-run sand free from silt or clay; the layer should be at least 15 cm thick, spread and compacted vertically.
- Open free-draining bitumen premix at least 10 cm thick. Compatibility with the facing materials must be checked.

It may be necessary to lay a geotextile over the drainage layer if there is any danger of angular material puncturing the geomembrane, or a factory-made geomembrane/geotextile composite may be used. In addition to providing puncture protection, the geotextile slows down the flow from localised leaks through the membrane.

Drainage capacity beneath the geomembrane may be increased by laying perforated pipe drains downslope, discharging at the upstream toe.

In some cases, the natural drain material and geotextile may be replaced with a thicker geotextile acting as a filter at the surface and a drain in the middle. Fines from the dam fill must not clog the material (as in normal filter practice). The designer must also check that the geotextile's drainage capacity is adequate under the compressive stresses applied to it and the risk of creep. Although very easy to install, this system does seem to have the drawback of diminishing drainage capacity towards the bottom of the slope, due to the higher hydrostatic load. With materials currently available on the market therefore, it should not be used as the only drainage system except if the dam is not more than about 15 m high.

Dans le cas d'un barrage en matériau semi-perméable, dont la membrane n'est pas drainée (voir 4.1.4. b), la couche support est confondue avec la couche de forme, ou bien est limitée à un géotextile antipoinçonnement.

4.4. LA GÉOMEMBRANE

4.4.1. Choix de la géomembrane

La géomembrane étanche est choisie pour résister à l'ensemble des sollicitations décrites au chapitre 3-2. Une couche de protection permet d'éviter ou d'atténuer les sollicitations suivantes :

- Sous-pressions internes;
- Choc thermique;
- Vent;
- Batillage;
- Rayonnement UV;
- Gel;
- Choc des corps flottants;
- Agression par les animaux, les plantes;
- Agression par l'homme.

Cependant la capacité de la géomembrane à résister par elle-même à de telles agressions devra être prise en compte attentivement lors de son choix car elle intervient dans les phases de construction ou en cas d'incident localisé dans la couche de protection.

4.4.2. Mise en œuvre en zone courante

Un plan de pose devra être établi, tenant compte de la géométrie de l'ouvrage, de la longueur des rouleaux, etc.

Les rouleaux seront positionnés en crête de digue, de manière à ce que les largeurs prescrites pour les joints soient respectées. Ils seront, selon leur poids, déroulés à la main ou avec des engins de manutention et du haut vers le bas. Ils seront lestés pour éviter le soulèvement au vent. Le déroulement doit être réalisé de manière à éviter les plis qui constitueraient des points faibles pour les raccords.

Les géomembranes préassemblées en usine ou en atelier (voir 2.1.6.) seront livrées sous forme de ballots positionnés à l'emplacement adéquat pour permettre de les déplier à la main, sans translation. Dans ce cas, un lestage pour éviter le soulèvement au vent est primordial.

Les joints horizontaux entre deux lés successifs sont déconseillés car soumis à des efforts de traction. Lorsque, pour des rampants très longs, ces joints s'avèrent malgré tout nécessaires, on les réalisera à des cotes différentes. Le chevauchement des panneaux se fera alors de manière à ce que le panneau le plus haut recouvre le panneau le plus bas (Fig. 12).

If the dam is built of semi-pervious material with no geomembrane underdrain (4.1.4b. above), the base and supporting layers are one and the same and may be replaced by a geotextile as protection against punctures.

4.4. GEOMEMBRANE

4.4.1. Choice

A watertight geomembrane is selected to resist all the loads and attacks discussed in section 3.2. A protective layer completely or partially protects it against the following :

- internal uplift pressures;
- high temperature gradients (thermal shock);
- wind;
- waves;
- ultra violet radiation;
- frost;
- impact from floating debris;
- damage from animals and plants;
- willful damage.

Nevertheless, the geomembrane's inherent capacity for resisting such attacks must be given careful attention when selecting the best type, since it will be important during construction or in the event of local damage to the protective layer.

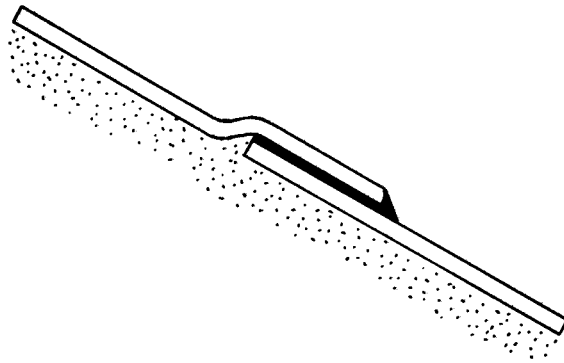
4.4.2. Installation

The job of laying the geomembrane must be carefully planned with due consideration to dam geometry, roll length, etc.

The rolls are positioned at the dam crest so that the edges overlap by the specified amount for seams. They are unrolled from top to bottom, by hand or machine, depending on their weight. They must be weighted down to prevent them being lifted by the wind. No folds or wrinkles should be left as the material is unrolled, since they would weaken the seams.

Geomembranes fabricated as panels in the factory or fabrication plant (2.1.4. above) are brought to the jobsite folded and suitably positioned so that they do not have to be moved as they are unfolded by hand. Weights to prevent the geomembrane lifting in the wind are crucial in this case.

Horizontal seams are best avoided because of the tensile stresses on them. If they are inevitable on very long slopes, they should be staggered across the width of the dam. The higher panel should always overlap the lower one (Fig. 12).



4.4.3. Ancrage en tête

La géomembrane peut être fixée au corps de barrage à sa partie supérieure. Mais en général il convient, pendant le montage du dispositif, de permettre le relâchement de la membrane en utilisant des fixations temporaires.

L'ancrage définitif n'est à réaliser, éventuellement, qu'à l'achèvement de la couche de protection et après qu'elle se soit mise en place convenablement (voir Fig. 13). Il sera possible dans la plupart des cas d'éviter tout ancrage définitif de la géomembrane en tête du parement. Mais alors, et dans le cas d'un corps de barrage constitué de matériau peu perméable, des précautions telles que la création d'une étanchéité secondaire sous la crête seront prises pour éviter que les eaux de ruissellement des rives et de la crête de l'ouvrage ne pénètrent dans le drain (voir Fig. 14).

Par contre, une géomembrane non recouverte d'une couche de protection doit impérativement être ancrée en tête.

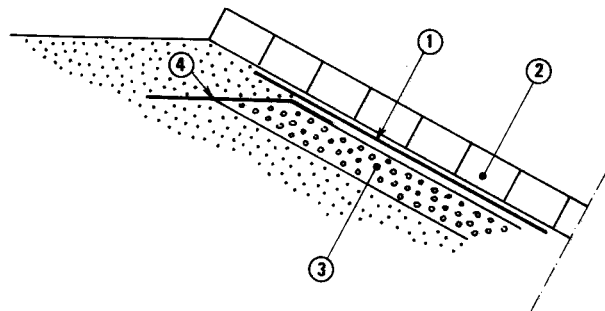
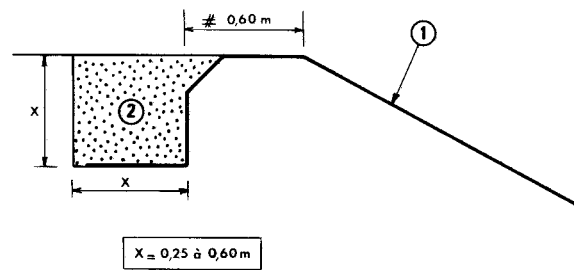


Fig. 12
Horizontal Seam Arrangement.
Joint horizontale entre 2 panneaux.

4.4.3. Crest Anchorage

The geomembrane may be fixed to the dam at the top. But generally, it is best to provide temporary means of holding it in place while it is being laid so that it stays loose and does not stretch.

The permanent anchorage (if applicable) should not be completed until the protective layer has been placed and has had time to settle (Fig. 13). In most cases, it is possible to omit any permanent anchorage of the geomembrane at the crest, but if the dam is built of low permeability material, precautions such as a secondary watertight system under the crest must be taken to prevent runoff from the crest and abutments entering the drain layer (Fig. 14).

If there is no protective layer, the geomembrane must always be anchored at the crest.

Fig. 13
Typical Crest Anchorage.
Exemple d'ancrage en tête.

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| (1) Geomembrane. | (1) <i>Géomembrane.</i> |
| (2) Compacted Backfill. | (2) <i>Remblai compacté.</i> |

Fig. 14
Typical Details without Crest Anchorage.
Exemple de géomembrane non ancrée en tête.

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| (1) Geomembrane. | (1) <i>Géomembrane.</i> |
| (2) Protective Layer. | (2) <i>Protection.</i> |
| (3) Drain. | (3) <i>Drain.</i> |
| (4) Geomembrane not bonded to 1. | (4) <i>Géomembrane non fixée à 1.</i> |

4.4.4. Ancrage de pied

En règle générale, en pied de barrage, un ouvrage secondaire établit la liaison entre l'organe d'étanchéité de la fondation et la membrane étanche : cet ouvrage secondaire est réalisé soit en béton, soit en matériau argileux.

Dans d'autres cas, la géomembrane est prolongée sous forme de tapis quasi horizontal, ou même constitue le fond étanche de la cuvette.

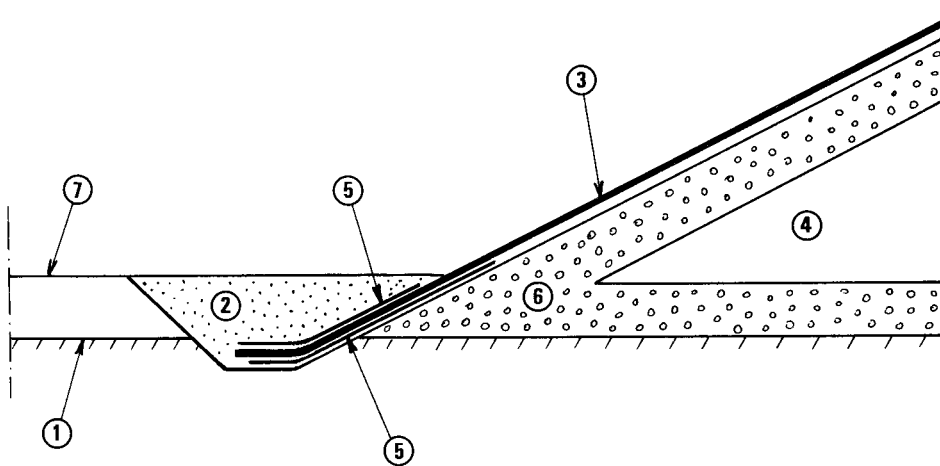
Dans tous les cas, au voisinage de la ligne d'intersection du talus amont du barrage et des bords de la cuvette, se situent d'importantes déformations localisées, dues au poids du barrage et à la poussée de l'eau.

Dans le cas de sols d'appui très déformables, il y a lieu d'écarter du pied du barrage la zone de raccordement des différents types d'étanchéité.

La continuité de la membrane, lorsqu'elle se prolonge sur la cuvette, ne dispense pas de traiter cette zone de façon particulière.

a) Raccordement par un ancrage en terre

L'extrémité basse de la géomembrane sera arrêtée au pied du barrage entre deux couches horizontales compactées ou selon les dispositions de la Fig. 15.



On pourra adopter, comme sur la Fig. 15, une disposition où la géomembrane ne forme pas un angle à la jonction entre le talus amont et l'ancrage. On pourra aussi protéger la membrane des risques de poinçonnement lors du compactage en la plaçant, dans la tranchée, entre 2 géotextiles.

4.4.4. Toe Anchorage

As a general rule, there is a special concrete or clay structure at the dam toe to connect the facing to the foundation.

Alternatively, the geomembrane may extend upstream as a near-horizontal blanket, or even cover the whole reservoir floor.

There also always significant localised deformations at the intersections between the dam slope and the sides of the reservoir due to the weight of the dam and water.

If the underlying soils are very deformable, the lower end of the dam facing should be moved away from the toe.

Even if the geomembrane extends some distance into the reservoir, special attention must always be paid to the toe anchorage.

a) Anchorage in Earthfill

The lower edge of the geomembrane is sandwiched between two horizontal compacted layers of suitable soils or as shown in Fig. 15.

Fig. 15

Toe Anchor Trench.

Ancrage de pied par une tranchée en terre.

- | | |
|------------------------------------|---|
| (1) Impervious Foundation. | (1) <i>Substratum étanche.</i> |
| (2) Compacted Impervious Backfill. | (2) <i>Matériau étanche compacté.</i> |
| (3) Geomembrane. | (3) <i>Géomembrane.</i> |
| (4) Dam Body. | (4) <i>Corps de barrage.</i> |
| (5) Geotextile. | (5) <i>Géotextile.</i> |
| (6) Drain and Outlet. | (6) <i>Drain et collecteur de drainage.</i> |
| (7) Ground in place. | (7) <i>Terrain naturel.</i> |

Fig. 15 shows an arrangement in which the geomembrane is not bent at an angle at the toe anchorage. An added advantage is sandwiching the geomembrane between two layers of geotextile in the toe trench to protect it against being punctured while compacting the backfill.

b) Raccordement à un parafeuille en béton

b 1) Principe

Selon le matériau constitutif de la géomembrane, celle-ci sera collée au béton ou bien pincée entre le béton et une plaque métallique.

La surface de contact entre le béton et la géomembrane doit être la plus lisse possible (état de surface du type « taloché fin »).

La surface de contact doit être disposée de manière à ce que les déformations différentielles entre le parafeuille et le remblai soient le plus continues possibles, comme cela est réalisé sur les Fig. 16a et 16b.

Il convient en outre que la surface de contact de l'ouvrage rigide prolonge le plan de la géomembrane de façon à éviter toute pliure brutale.

b 2) Réalisation

Selon le type de géomembrane, on effectue un collage ou un serrage.

Collage (voir Fig. 16a).

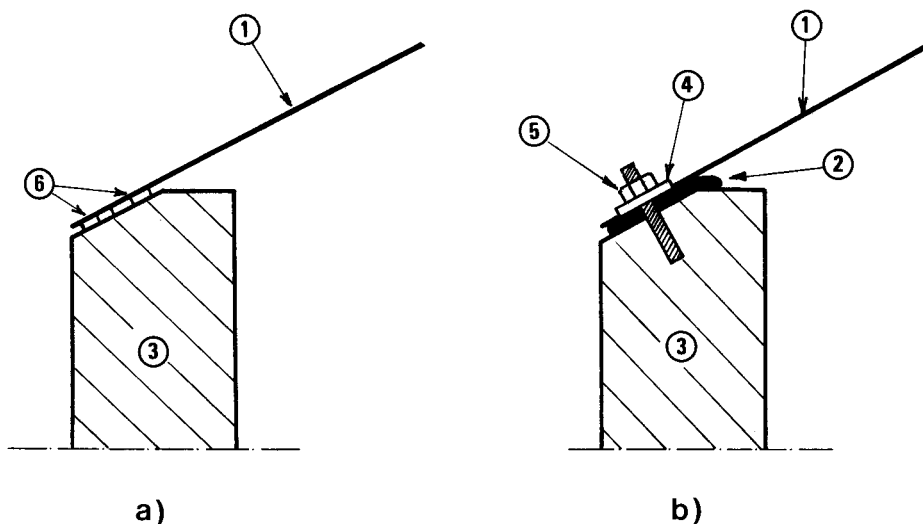
La géomembrane est collée sur le béton avec si possible une couche intermédiaire épaisse et souple (mastic, caoutchouc, bitume). Il convient de s'assurer de la compatibilité chimique de ce matériau avec la géomembrane.

D'autres solutions sont possibles, comme par exemple le collage à un joint waterstop partiellement scellé dans le béton. On devrait également pouvoir utiliser des profilés métalliques revêtus de plastique sur lesquels serait fixée une géomembrane.

Serrage (voir Fig. 16b).

La géomembrane est pincée entre un fer plat et le béton ou bien entre 2 fers plats dont l'un est scellé dans le béton.

Dans les 2 cas, il est conseillé d'interposer un matériau souple (mastic, caoutchouc...) sur les 2 faces de la membrane, là où elle est pincée. Ce matériau



b) Anchorage on Concrete Cutoff

b 1) Design

The geomembrane is bonded to the concrete, or clamped between the concrete and a metal plate, depending on the constituent material.

The contact area between the concrete and the geomembrane must be as smooth as possible (fine steel-trowelled finish).

The geometry of the contact surface must be such as to ensure that the differential settlement between the cutoff and the dam fill does not cause any sudden changes, as shown in Fig. 16a and 16b.

It is recommended that the concrete contact surface should be parallel to the main body of the geomembrane, in order to avoid any sudden changes in angle.

b 2) Construction

The geomembrane will be bonded with solvent or adhesive, or clamped in place, to suit the type of material employed.

Bonded Anchorage (Fig. 16a)

The geomembrane is bonded to the concrete, preferably through the medium of a thick, flexible material (bodied solvent, rubber, bitumen). The designer must check the chemical compatibility of the bonding agent with the geomembrane material.

There are other possibilities also, such as bonding the geomembrane to a waterstop strip partially buried in the concrete. It should also be possible to use plastic-covered metal ribs to which the geomembrane can be bonded.

Clamped Anchorage (Fig. 16b)

The geomembrane is clamped between a flat and the concrete or between a pair of flats, the bottom one being cemented into the concrete.

In either case, it is recommended to coat both sides of the geomembrane with a flexible mastic, rubber compound, etc. at the mating faces. This compressible

Fig. 16

Connection to Concrete Cutoff.

Raccordement à un parafouille en béton.

- (1) Geomembrane.
- (2) Resilient Material.
- (3) Concrete.
- (4) Steel Flat.
- (5) Bolt.
- (6) Bonded.

- (1) *Géomembrane.*
- (2) *Matériau déformable.*
- (3) *Béton.*
- (4) *Fer plat.*
- (5) *Boulon.*
- (6) *Zone collée.*

compressible parfait l'étanchéité en évitant tout décollement entre la plaque métallique et le béton ou entre les 2 plaques. Il protège également la membrane des aspérités du béton.

Toutes les parties métalliques (plaques, boulons...), doivent être en acier inoxydable.

4.4.5. Raccordement aux autres ouvrages en béton (vidanges, déversoirs)

Ce problème a déjà été évoqué dans le chapitre 4.1. relatif à la conception du barrage. En outre, lors de la réalisation des travaux, un soin particulier devra être porté au compactage contre les massifs en béton : compactage par couches très minces au moyen de dames mécaniques par exemple.

Des dispositions semblables à celles citées en 4.4.4. (b 1) et 3.2.2. pour le cas des parafouilles en béton seront adoptées.

4.4.6. Éléments singuliers des talus

On a déjà signalé en 4.1.3. l'intérêt qu'il y avait à adopter un axe de barrage rectiligne et à éviter des changements de pente du parement ou des risbermes. Dans le cas contraire, on pourra prévoir, si possible, des joints glissants le long des lignes singulières (voir 4.4.7.).

4.4.7. Joints

Selon la nature de la membrane, les joints sont réalisés par collage ou par soudure. Les joints constituent souvent le point faible de l'étanchéité. Aussi un grand soin doit-il être apporté à leur réalisation puis à leur contrôle.

On veillera à la très grande propreté des surfaces à raccorder et on évitera de réaliser des joints par temps de pluie ou par vent violent. Selon les matériaux constitutifs de la membrane, des conditions de température minimale ou maximale devront être imposées (température minimale pour les membranes thermoplastiques et bitumineuses; température maximale pour les membranes bitumineuses et en PEHD).

Dans certains cas, pour diminuer le nombre de joints réalisés sur le chantier, des préassemblages de grands panneaux pourront être effectués en atelier.

Les largeurs minimales des chevauchements des lés à souder ou à coller dépendent des matériaux et doivent être vérifiées scrupuleusement. Dans certains cas, on pourra ajouter une bande couvre-joint. Cela devrait être obligatoire au moins pour tous les raccords en T et pour toutes les zones plissées. Lorsque l'on a placé un géotextile sous la géomembrane, cela facilite le travail de soudure ou de collage en garantissant une surface propre.

Les largeurs minimales de soudure ou collage entre lés conseillées sont :

- membranes bitumineuses : 15 à 20 cm;
- membranes PVC et CPE : 5 cm (soudure), 10 cm (collage);
- butyl, EPDM, CSPE, PEHD : 10 cm.

Le contrôle systématique de qualité des joints doit être d'abord visuel. Des appareils de contrôle existent (contrôle par ultrason, par lance à air, par cloche à vide, méthode électrique), et il convient de prévoir cette prestation dans le devis estimatif.

material will ensure a watertight joint by preventing the geomembrane from separating from the metal plate(s) and/or concrete. It will also protect the geomembrane from damage by sharp edges in the concrete.

4.4.5. Anchorage on Concrete Outlet and Spillway Works

This topic has already been mentioned in paragraph 4.1. in connection with dam design. During construction, particular attention should be given to compaction against the concrete structures. The fill should be compacted in very thin layers by pedestrian-controlled tampers and similar equipment.

Arrangements like those described in paras. 4.4.4.b 1 and 3.2.2. should be adopted, as for concrete cutoffs.

4.4.6. Dam Face Singularities

Mention has already been made in para. 4.1.3. of the advantages of designing a straight dam axis and avoiding changes in slope in the dam face or berms. If this is not possible, sliding joints should be provided at singularities as far as feasible (paragraph 4.4.7.).

4.4.7. Seams

Seams are made with solvent, adhesive or welding methods to suit the material utilized. Seams are often the weakest point in the facing, and special care should be given to seaming and inspection.

Surfaces should be perfectly clean; work should be stopped in rain or strong winds, and when the temperature is higher or lower than the accepted range for the material in question. (The minimum temperature is important for thermoplastic and bituminous geomembranes, while bituminous and HDPE materials are controlled (also) by the maximum temperature.)

Under suitable conditions, the number of field seams can be kept to a minimum by preparing larger panels in the fabrication plant.

Minimum overlap at seams depends on the material and rigorous site inspection is needed to ensure that the design values are adhered to. Extra sealing strips may be required; they should be obligatory at least for all tee seams and where the geomembrane is wrinkled. A geotextile underlay makes seaming easier by preventing dirt from contaminating the joint.

Minimum overlaps for solvent, adhesive and welded seams are recommended as :

- bituminous geomembranes : 15-20 cm.
- PVC and CPE : 5 cm (welded),
10 cm (glued).
- Butyl rubber, EPDM, CSPE, HDPE : 10 cm.

All seams should be inspected visually. Testing equipment is also available (ultrasonic, air hose, vacuum bell, electric method) and such tests should be included in the contract.

Des contrôles destructifs par sondage doivent également être effectués par prélèvements d'échantillons à cheval sur les raccords. Les essais à réaliser sont des essais de traction et de pelage.

Certains matériaux thermoplastiques se prêtent bien à la réalisation de double soudure avec canal central permettant un contrôle par pression pneumatique ou hydraulique.

L'emploi de membranes translucides facilite également le contrôle visuel des soudures dès la mise en œuvre.

Dans le cas de points singuliers dus à un changement de la géométrie du talus, la technique du joint glissant peut s'avérer utile. Un tel joint est réalisé en interposant entre les deux lés à raccorder un matériau plus déformable que celui qui constitue la membrane. Ce matériau supprime le risque de formation d'un plan de cisaillement à l'intérieur de l'une des deux bandes de géomembranes bitumineuses collées à l'aide d'un bitume à faible viscosité.

4.5. COUCHE DE PROTECTION

La couche de protection met la géomembrane partiellement ou totalement à l'abri des sollicitations évoquées aux § 3-2 et 3-3. Elle ne doit ni glisser sur le rampant, ni poinçonner la membrane sous l'effet de la vidange du barrage, du batillage, de la déformation du corps du barrage; elle doit en outre s'opposer au développement de la végétation, à l'action des animaux et aux actes de vandalisme.

Le mode de construction de cette couche doit être choisi de façon à éviter de mettre progressivement la géomembrane en traction.

Dans certains cas, la pente du talus amont du barrage sera conditionnée par la stabilité de la protection.

La couche de protection peut être réalisée en enrochements, en béton bitumineux, en blocs de béton ou en dalles préfabriquées. Des blocs en enrochements présentent l'avantage de dissiper une partie de l'énergie due aux vagues. Dans les autres cas, le revêtement ayant une faible rugosité, la revanche au-dessus des plus hautes eaux devra tenir compte de la hauteur accrue de la lame d'eau déferlante.

La nécessité de protéger les géomembranes dans le cas de barrages d'une certaine importance ne doit pas faire oublier les inconvénients qui en résultent dont plusieurs ont été précédemment évoqués au § 3-4 :

- risque de mise en traction de la membrane;
- impossibilité d'examen visuel de la membrane;
- difficulté des réparations en cas d'incident.

Ces inconvénients ont pu amener à choisir des matériaux faciles à enlever tels que des dalles en béton préfabriquées de faible poids posées (ex : barrage de Codole) ou collées sur géotextile (ex. : barrage du Mas d'Armand). En effet, il est essentiel de pouvoir intervenir pour réparer une géomembrane dégradée soit à la suite d'incidents localisés, soit par suite du vieillissement.

4.5.1. Enrochements

Le poids unitaire des enrochements à mettre en œuvre sur la surface en contact avec l'eau sera déterminé en fonction de l'amplitude du batillage sous l'effet des plus fortes vagues.

Samples should also be taken of seams, for tensile and joint peel strength tests.

Some thermoplastic materials are suitable for joining with a double seam enabling water or air to be pumped through the channel between them to test for leaks.

Translucent geomembranes enable seams to be checked visually as they are made.

Sliding joints may be useful at singularities where slope geometry changes. A sliding joint has more deformable material between the two thicknesses of geomembrane, removing the risk of a shear plane developing in one of the geomembrane layers at the join. This technique has been used successfully with bituminous membranes bonded with a low viscosity bitumen adhesive.

4.5. PROTECTIVE LAYER

The protective layer completely or partially protects the geomembrane against the types of attack mentioned in paras. 3.2. and 3.3. It must not slide down the slope or puncture the geomembrane under conditions of rapid drawdown, wave action or dam settlement. It must also act as an effective barrier against plant growth, burrowing animals and vandals.

The work programme for constructing the protective layer must be carefully planned so that the geomembrane is not gradually tensioned or stretched as the material is placed.

The protection may consist of rockfill, bituminous concrete, or prefabricated concrete blocks or slabs. Relatively large pieces of rock (rip rap) have the advantage of dissipating some of the wave energy. If the surface of the protective layer is smooth, the freeboard above top water level should be sufficient to allow for waves running up the slope.

The need for protection to the geomembrane on large dams should not obscure the associated problems mentioned in paragraph 3.4. :

- risk of tensioning or stretching the membrane;
- impossibility of visually inspecting the geomembrane;
- difficulty of repairing damage.

Because of these inconveniences, designers sometimes prefer materials that can be readily removed such as small, lightweight prefabricated concrete slabs laid on (e.g. Codole dam) or bonded to (Mas d'Armand dam) a geotextile. It is vital to be able to repair damaged or deteriorated (aged) geomembranes.

4.5.1. Rockfill Protection

The unit weight of rockfill in direct contact with the reservoir depends on the size of the largest waves.

Il y a lieu d'éviter le poinçonnement de la membrane d'étanchéité pendant la mise en œuvre de la couche de protection. La circulation des engins de chantiers directement sur la membrane d'étanchéité est proscrite, sauf justification contraire du fournisseur ainsi qu'il a été indiqué au § 3-2-3.

Le dispositif antipoinçonnement, placé au-dessus de la membrane étanche, pourra être constitué par :

- un géotextile antipoinçonnement;
- une couche d'épaisseur suffisante de gravier si possible roulé. Le matériau constituant cette couche ne comportera pas d'éléments fins susceptibles d'être entraînés ou déplacés par les courants d'eau liés au battillage ou au marnage du plan d'eau.

Il pourra paraître avantageux dans certains cas de réaliser la couche de protection sous forme d'une recharge de largeur suffisante pour être construite par couches horizontales compactées. Cela n'exclut pas le dispositif antipoinçonnement.

4.5.2. Enrobés bitumineux

Si un tel matériau est compatible avec la géomembrane, la protection pourra être assurée par une couche d'enrobé bitumineux ouvert, présentant un pourcentage de vides de 4 à 8 %, d'épaisseur suffisante pour résister à l'action des vagues les plus fortes et aux efforts statiques.

En surface, l'enrobé pourra être fermé pour réduire les possibilités de développement de la végétation, notamment au-dessus de la surface du plan d'eau normal. Cette disposition ne doit cependant pas s'opposer à l'évacuation des sous-pressions.

L'enrobé pourra être mis en place à froid ou à chaud; dans chaque cas, il faudra vérifier que la géomembrane n'est pas altérée par les solvants employés, par le choc thermique et par l'effet du compactage du béton bitumineux. Un dispositif antipoinçonnement, par exemple un géotextile, pourra être disposé entre l'enrobé et la géomembrane.

4.5.3. Blocs de béton et dalles préfabriquées

L'expérience acquise montre que les plaques de béton coulées en place sous forme soit de dalles de béton maigre, soit de voiles en béton armé, posent de nombreux problèmes de tenue dans le temps et de trop grande rigidité.

La protection peut être assurée par des dalles de grande dimension (quelques mètres carrés) coulées en place, ou par des pavés ou dallettes préfabriquées qui peuvent être placés à la main.

Dans ce dernier cas, le poids des éléments est généralement insuffisant pour qu'ils résistent de manière indépendante aux vagues. On utilise donc des pavés équipés de tenons et mortaises (pavés autobloquants), à condition que l'on puisse garantir une régularité de fabrication de ces pavés (risque de déboîtement sous l'effet des vagues). On utilise aussi des pavés collés sur un géotextile et posés par bandes préfabriquées.

Pour limiter le risque de soulèvement des dalles ou dallettes par sous-pression, on peut interposer une couche drainante d'épaisseur suffisante, constituée d'une grave dépourvue de fines. Sa granulométrie doit être en rapport avec la largeur réelle

The rock protection must not puncture the geomembrane when it is being spread. Vehicles and plant must not be allowed to travel directly over the geomembrane except if otherwise specifically permitted by the manufacturer (paragraph 3.2.3.).

The overlay protecting the geomembrane against puncturing may be :

- a strong geotextile, or;
- a sufficient thickness of preferably rounded gravel. It must not contain fines liable to be entrained or displaced by currents caused by waves or fluctuations in reservoir level.

It may be advantageous to build the protective layer thick enough to be rolled in horizontal layers, but the puncture protection will still be needed.

4.5.2. Bitumen Premix Protection

An open-graded layer of bitumen-coated aggregate with 4-8 per cent voids may be utilized for the protective layer if it is compatible with the geomembrane. Thickness must be sufficient to resist the largest waves and withstand static loads.

The surface may be sealed to prevent plant growth, especially above normal reservoir level. Means must still be provided for dissipating uplift pressure.

The premix can be laid hot or cold; in both cases, check that the geomembrane is not affected by the solvents, thermal shock or compaction of the protective layer. A geotextile or similar protection against puncture can be laid over the geomembrane before applying the protection.

4.5.3. Prefabricated Concrete Slabs and Blocks

Experience has shown that *in situ* lean concrete slabs and reinforced concrete facing entail many problems with durability and excessive stiffness.

The geomembrane can be protected with large (a few square metres area) *in situ* slabs, or prefabricated pavings often laid by hand.

Concrete pavings are not usually heavy enough to resist wave action alone. They therefore may have mortise and tenon joints provided that prefabrication standards are sufficiently stringent (failing which, the interlocking joints may be “ sprung ” by wave action). Pavings bonded to geotextile and laid in prefabricated strips are also used.

The danger of the pavings or slabs heaving from uplift pressure can be controlled by bedding them on an appropriately thick drain layer of non-fines gravel. Gravel grading must be chosen to suit the actual joint widths to prevent the finer

des joints pour éviter tout soutirage d'éléments sous l'action du batillage. Entre le massif drainant et la géomembrane, il convient de placer un dispositif antipoinçonnement, par exemple constitué par un géotextile qui assure aussi une certaine fonction drainante.

Dans le choix de l'épaisseur et du poids des blocs, on tiendra compte de l'amplitude du batillage, de la pente et de la résistance au cisaillement dans le plan de séparation des couches.

4.5.4. Absence de protection

Une raison importante conduisant à protéger une membrane est sa fixation dans toutes les directions, et en particulier dans le sens perpendiculaire au plan de pose. Si l'on se dispense de la protection, les mouvements répétés de la géomembrane dus au vent, ou au batillage vont provoquer une fatigue du matériau et donc une perte progressive de ses caractéristiques mécaniques. Pour y remédier, deux techniques ont été utilisées. Dans le cas de petits barrages, des lests discontinus peuvent être posés de part en part pour compléter l'ancrage en tête et l'ancrage de pied. Ainsi, en Espagne, plusieurs bassins ont été étanchés par des géomembranes renforcées (PVC + géotextile non tissé), non protégés, et revêtues par des longrines en béton placées dans un plan vertical et espacées de quelques dizaines de mètres. Une telle solution semble admissible pour des petits ouvrages, ou pour des retenues destinées à rester pleines.

Une autre solution convient aussi pour des ouvrages plus importants, même si la retenue n'est pas permanente : elle consiste à fixer la géomembrane sur un support rigide. Cette solution, d'abord utilisée pour réparer des masques en béton commence à être envisagée également pour des projets neufs. Elle est décrite en 5.

4.6. CONTRÔLE DU DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ

Des contrôles particuliers dus à la fragilité relative des géomembranes sont nécessaires; ils sont à réaliser suivant trois modalités :

- lors de l'exécution;
- à la première mise en eau;
- en exploitation courante.

a) Lors de l'exécution, un contrôle soigné des différentes phases d'exécution du dispositif d'étanchéité sera réalisé. En particulier, on s'efforcera de mesurer les mouvements relatifs éventuels des différentes couches. Une vérification en continu de la qualité des joints est indispensable.

b) A la mise en eau, il faudra contrôler en permanence le débit des différents exutoires et interpréter les mesures au fur et à mesure de la montée du plan d'eau.

c) En exploitation, on continuera à surveiller avec soin l'évolution des débits de fuite. Cette surveillance doit être encore plus rapprochée que pour un barrage dont l'étanchéité n'est pas assurée par une géomembrane. En effet, il est important de diagnostiquer rapidement une fuite compte tenu du risque d'évolution en retard. Un dispositif de mesure automatique du débit de fuite et d'alerte en cas de dépassement d'un certain seuil est souhaitable, mais il faudra bien veiller à ce que cela n'aboutisse pas à un espacement de la surveillance visuelle, auquel cas la sécurité obtenue pourrait être illusoire.

particles being washed out by waves. Puncture protection must also be provided between the drain material and the geomembrane; a geotextile will have the added advantage of providing some drainage capacity also.

Factors to be considered in setting the weight and thickness of the blocks are wave height, face slope and shear resistance on the interfaces between layers.

4.5.4. Unprotected Geomembranes

One important reason for laying protection over a geomembrane is to hold it in place in all directions, including in the direction perpendicular to the face. If the protective layer is omitted, the repeated movements caused by wind and waves will fatigue the geomembrane and its mechanical properties will steadily deteriorate. Two ways have been used to overcome this problem. At small dams, a pattern of weights can be laid on the geomembrane to supplement the effects of the crest and toe anchorages. In Spain for example, several reservoirs have unprotected reinforced (PVC/non-woven geotextile) geomembranes with concrete beams a few metres apart laid on top, downslope. This arrangement appears satisfactory on small structures or where the water level is never lowered.

An alternative suitable for larger dams with fluctuating water level consists of fixing the geomembrane on a rigid backing. First used for repairing concrete facings it is now starting to be considered for new dams. The technique is described in Chapter 5.

4.6. QUALITY CONTROL AND PERFORMANCE MONITORING

Stringent testing and inspection procedures are required in view of the relative fragility of geomembranes. There are three stages in the process :

- during construction;
- during first filling of the reservoir;
- during the operational life of the structure.

a) Careful quality control of the various phases of construction of the facing is necessary. Measurements should be made of movements of layers relative to each other (if any). Continuous quality control of all seams is crucial.

b) During impounding of the reservoir, drain discharge must be continuously monitored, and records subjected to interpretation as the reservoir level rises.

c) Once the dam has gone into operation, drain discharge measurements must be attentively pursued, at closer intervals than for dams not rendered watertight by a geomembrane-based system, since it is important to investigate any leakage in the shortest time because of the piping risk. An automatic leakage monitoring and alarm system (emitting an alarm if the leakage rate exceeds a set value) is desirable but this must not be considered sufficient reason for less frequent visual inspections, since there might arise a false sense of security.

5. AMÉLIORATION DE L'ÉTANCHÉITÉ DE MASQUES EN BÉTON PAR DES GÉOMEMBRANES

Ce chapitre tient compte de l'expérience acquise ces dernières années lors de réparations de masques en béton de barrages en remblai. On peut également envisager l'utilisation de géomembranes pour parfaire l'étanchéité de masques en béton lors de leur construction.

Il peut être nécessaire de réparer des masques de barrages anciens lorsque les débits de fuite deviennent excessifs. Les causes peuvent être notamment les suivantes :

- une irrégularité des tassements du remblai ou de la fondation;
- une mauvaise qualité du béton;
- la présence de fissures de retrait, etc.

La technique de réparation classique consiste à reprendre les joints défectueux et les fissures. Dans bien des cas, un traitement d'ensemble s'avère malgré tout nécessaire après quelques années.

L'utilisation de géomembranes pour de telles réparations d'ensemble est alors envisageable en concurrence avec d'autres procédés.

5.1. TECHNIQUES UTILISÉES A CE JOUR

Deux techniques, relativement différentes, ont été utilisées à ce jour.

5.1.1. Membrane adhérente au support béton

Citons deux exemples de réparations importantes :

- le barrage de Paradela (Portugal), réparé en 1980, constitue le record d'utilisation d'une membrane : hauteur de 110 m et surface traitée de 45 000 m²,
- le barrage du Rouchain (France), réparé en 1983 et haut de 60 m.

Tous deux sont des barrages en enrochements, à masque en béton avec des pentes de parement amont comparables (1/1,3 à Paradela et 1/1,4 au Rouchain).

La solution retenue dans ces deux cas a consisté à placer sur l'ensemble du masque une géomembrane fabriquée en place. Cette membrane est constituée d'un géotextile non tissé, imprégné de monomère acrylique et d'une émulsion de latex et de bitume. La polymérisation du monomère assure d'une part l'étanchéité, d'autre part le collage au béton et entre chaque lè de géotextile imprégné. Le procédé de collage par polymérisation permet aussi des réparations ponctuelles aisées en cas de déchirure. Dans les deux cas, les géomembranes ne sont pas protégées.

Par la suite, ce même procédé a été utilisé en 1986 pour le barrage de Martin Gonzalo en Espagne. Il s'agit d'un barrage en enrochement de 54 m de hauteur. Les enrochements du site ayant un module de déformation très faible, un masque en béton n'a pu être retenu. Un masque plus souple a été choisi. Il comporte une couche

5. GEOMEMBRANES FOR ENHANCED WATERTIGHTNESS OF CONCRETE FACINGS

This Chapter discusses the experience acquired in recent years in the repair of watertight concrete facings to embankment dams. Geomembranes can also be used as an adjunct to a concrete facing in the original design.

It may be necessary to repair the concrete facings to old dams when leakage becomes unacceptable. The causes of the deterioration might be :

- irregular settlement of the fill or foundation;
- poor concrete quality;
- shrinkage cracks, etc.

Conventional repair methods consist of sealing defective joints and cracks, but in many cases, some sort of overall treatment is still needed after a few years.

The use of geomembranes for such overall repairs can be considered competitive with other alternatives.

5.1. TECHNIQUES USED TO DATE

Two relatively different techniques have been used to date.

5.1.1. *In Situ* Jointless Membrane

Two major examples are :

- Paradela dam (Portugal), repaired in 1980, which holds the record for geomembrane applications : dam height 110 metres, membrane area 45 000 m².
- Rouchain dam (France), repaired in 1983, 60 m high.

Both are rockfill designs with concrete facings, and similar upstream face slopes (1/1.3. at Paradela, 1/1.4. at Rouchain).

The technique used in both cases was to cover the whole concrete facing with a membrane fabricated *in situ*. The membrane material was a non-woven geotextile impregnated with an acrylic monomer, and a bitumen latex emulsion. Polymerisation of the monomer confers the watertightness, and also acts to fuse the overlapping panels together, and to bond the whole membrane to the underlying concrete. This is also a convenient method of patching tears. At both dams, the geomembranes were left exposed, without a protective overlay.

The same technique was used subsequently in 1986 for the Martin Gonzalo dam in Spain, a 54 m high rockfill structure. Since the rockfill available at the site had a very low deformation modulus, a concrete facing was not suitable, and a more flexible system was chosen. It comprises a 3 m supporting layer of bitumen cement

support de 3 m de large en mortier de ciment-bitume froid compacté et dont la perméabilité est un peu supérieure à 10^{-7} m/s. La géomembrane déjà utilisée pour les barrages de Paradela et du Rouchain a ensuite été appliquée sur ce support spécialement étudié.

5.1.2. Membranes préfabriquées

Une seconde technique consiste à utiliser des géomembranes préfabriquées en usine, assemblées par collage ou par soudure et fixées au support.

Deux solutions de fixation ont été utilisées : le collage au béton et l'accrochage à l'aide de profilés métalliques ou de boulons.

a) Procédé par collage

La membrane peut être fixée sur le masque à l'aide d'une colle appropriée ou d'un produit qui participe aussi à l'étanchéité, tel qu'un bitume à chaud.

Même si les techniques sont très différentes, le résultat est semblable au procédé *in situ* cité en 5.1.1. : dans les 2 cas, la membrane est adhérente à son support.

b) Procédé par fixation

Un procédé intéressant consiste à sceller dans le béton à étancher des profilés métalliques parallèles et régulièrement espacés. On vient alors fixer la géomembrane à l'aide de ces profilés. Un tel procédé a été utilisé en Italie en 1977 pour étancher le bassin de Gorghiglio (voir annexe 5). La membrane en PVC, non protégée, est fixée sur le parement amont des digues de ceinture selon un procédé principalement développé pour réhabiliter des barrages poids. On trouvera en 6.1. le principe détaillé de la fixation (barrage de Lago Nero notamment).

5.2. RECOMMANDATIONS POUR LA RÉPARATION DE MASQUES EN BÉTON

5.2.1. Préparation du support

Le support doit être préalablement nettoyé à la brosse ou au jet d'eau ou d'air. Les aspérités du béton doivent être enlevées pour ne pas poinçonner la membrane. En cas de béton très rugueux ou très alvéolé, l'interposition d'un géotextile peut être nécessaire. Dans le cas où la géomembrane est adhérente au support, tous les éléments de béton non adhérents doivent être enlevés et ragrésés.

5.2.2. Fixation de la membrane

La réalisation d'un ancrage en crête du barrage n'est pas suffisante car ces géomembranes ne seront en principe pas protégées. Il est alors nécessaire de les fixer sur toute la surface du parement pour éviter leur soulèvement par le vent ou les dépressions dues au batillage. On peut y parvenir par un clouage rapproché ou par des profilés de fixation ou par adhérence. L'adhérence peut être assurée par collage ou par polymérisation d'un monomère.

mortar, applied cold and rolled, with a permeability of slightly above 10^{-7} m/s, and a jointless geomembrane of the type used at Paradela and Rouchain.

5.1.2. Prefabricated Membranes

The other technique is to fix a bonded or welded factory-prefabricated geomembrane to the concrete facing.

It can be fixed to the concrete by an adhesive, or metal bars and bolts.

a) Adhesive

The geomembrane is fixed to the concrete with an appropriate adhesive or a waterproof substance like bitumen applied hot.

Although these methods are very different to the one described in paragraph 5.1.1., the result is similar in that the geomembrane is everywhere bonded to the underlying surface.

b) Bolts and Bars

An attractive method consists of cementing a regular pattern of parallel steel ribs in the concrete, to which the geomembrane is fixed. This technique was used in Italy in 1977 to waterproof the Gorghiglio reservoir (see Appendix 5). The unprotected PVC membrane is fixed to the upstream face of the embankments by a method developed chiefly for rehabilitating gravity dams. Details of the fixing method will be found in paragraph 6.1. below (Lago Nero dam in particular).

5.2. RECOMMENDATIONS ON REPAIRS TO CONCRETE FACINGS

5.2.1. Surface Preparation

The facing must be wire brushed and cleaned with a jet of water or air. Sharp points must be removed so that they cannot puncture the membrane. If the surface is very rough or pitted, it may be necessary to lay a geotextile. If the geomembrane is to be bonded to the concrete, all loose concrete and aggregate must be removed and sharp edges smoothed.

5.2.2. Membrane Fixing

Crest anchorage is not sufficient, since these geomembranes do not usually have an overlying protective layer. They must be held in place over the whole surface of the facing to prevent them being lifted and displaced by wind or waves. This can be done with closely-spaced "nails", metal ribs, adhesive or a monomer which polymerises *in situ*.

5.2.3. Drainage

Le barrage lui-même est supposé drainé ou drainant. Il n'est pas absolument indispensable pour la sécurité de drainer sous la géomembrane. En effet, en cas de défaillance, le masque en béton se substitue à la géomembrane en limitant les fuites et en évitant les risques de renard. Par contre, des fuites ou percolations d'eau à travers le béton sont toujours possibles. La pose d'un géotextile drainant sous la membrane est alors utile. Le drainage est facilité si la géomembrane n'est pas adhérente à son support.

5.2.4. Protection

On ne recouvre généralement pas les géomembranes placées sur un masque en béton. En effet, la rigidité du support diminue grandement les risques de détérioration de la géomembrane. Ainsi sont exclus par exemple un glissement d'ensemble, ou bien le soulèvement au vent, etc. Les risques de déchirure sont également réduits. Ceux qui subsistent sont notamment :

- la chute de blocs de rocher en zone montagneuse;
- le choc de corps flottants lourds;
- l'attaque des UV;
- le vandalisme.

Ces risques n'intéressent d'ailleurs pas, pour la plupart, toute la surface du masque. Dans le cas d'un support rigide, il est donc conseillé de ne pas recouvrir la géomembrane, et de favoriser le choix d'un procédé facile à réparer. Des mesures complémentaires telles que clôture, insufflation d'air, ... peuvent être nécessaires dans certains sites.

Enfin, des inspections régulières sont bien entendu absolument indispensables.

5.3. PERSPECTIVES NOUVELLES : LES OUVRAGES NEUFS

Le procédé faisant l'objet du présent chapitre a été utilisé pour réparer des ouvrages défaillants. Pour la première fois, il a été utilisé en 1986 sur un ouvrage neuf (voir 5.1.1.). Il est permis de penser que l'utilisation de géomembranes non protégées pour étancher des barrages en remblai neufs pourra se développer. Le support peut être constitué d'un matériau autre que le béton de ciment classique : béton bitumineux moyennement dosé par exemple.

La difficulté consiste à fixer correctement la membrane sur de tels matériaux. En cas de défaillance de la géomembrane, de tels supports seraient capables de suppléer la géomembrane en supprimant les risques de renard et en limitant les fuites, au moins durant le temps de la réparation. Ceci est un avantage important par rapport à une solution classique, sous l'aspect de la sécurité. Un autre avantage réside dans l'absence de revêtement de protection qui rend aisées surveillance et réparation.

5.2.3. Drainage

It is assumed that the dam has an adequate drainage system or is constructed of pervious material, and geomembrane underdrainage is not absolutely essential for safety; if leakage were to occur, the concrete facing provides a back-up controlling leakage and preventing piping. But leakage and seepage is still possible through the concrete, so that a geotextile drain under the membrane is useful. Drainage is improved if the geomembrane is not bonded to the underlying material.

5.2.4. Protection

It has not been common practice to provide protection for geomembranes added to the concrete facings on embankment dams, since the stiffness of the facing greatly reduces the risks of geomembrane deterioration. For example, there can be no generalised sliding, the wind cannot lift the geomembrane, etc. The risk of tears is also reduced. The dangers to which the geomembrane is still exposed are :

- falling rock at mountain sites;
- blows from heavy floating objects;
- ultra violet radiation;
- willful damage.

These risks do not affect the whole area of the geomembrane. If there is a rigid backing like a concrete facing, it is recommended to leave the geomembrane uncovered and select a technique in which repairs are easier to perform. Additional safeguards like fencing, bubbler systems, etc. may be needed at some sites.

Lastly, regular inspection is of course necessary.

5.3. PROSPECTS FOR NEW DAMS

The techniques discussed in this Chapter have been used to repair defective dams, but 1986 saw their first use at a new dam (see 5.1.1. above). There are reasons to believe that the use of unprotected geomembranes on new dams will become more common. The backing may be a material other than conventional concrete, such as bituminous concrete (with a moderate bitumen content), etc. The difficulty will be fixing the geomembrane safely to such materials. They do however provide an efficient back-up in the event of leakage through the membrane since they are not subject to piping and tend to limit flow rates, at least for the time necessary for repairs to be effected. This is an important asset as compared with conventional designs, in terms of safety. Another advantage is the absence of a protective overlay, so that inspection and maintenance is much easier.

6. UTILISATION DE GÉOMEMBRANES POUR RÉHABILITER LES BARRAGES EN MAÇONNERIE OU EN BÉTON

Nombre de barrages anciens en maçonnerie ou en béton sont relativement détériorés. Les fuites à travers des fissures en particulier peuvent être très préjudiciables pour des ouvrages destinés à stocker de l'eau. Des travaux de réhabilitation sont donc souvent nécessaires. L'objet principal de ce bulletin est l'utilisation des géomembranes pour étancher les barrages de remblai. Néanmoins, quelques exemples d'utilisations de géomembranes pour réhabiliter des barrages existants en béton ou en maçonnerie sont rapidement présentés ci-après pour illustrer ce type d'application en plein développement qui peut intéresser également des barrages en remblai.

6.1. PRÉSENTATION DES TECHNIQUES UTILISÉES A CE JOUR

Une première réhabilitation de barrage par géomembrane a été pratiquée en Italie, de 1969 à 1971, sur le barrage de Lago Baitone, haut de 37 m. L'ouvrage, en maçonnerie, a été construit entre 1927 et 1930 et son étanchéité a été parachevée par un masque Maurice LEVY, formé d'une série d'arches verticales en béton semi-circulaires. Les arches sont reliées à leur pied par une galerie longitudinale.

La détérioration du béton a conduit à intervenir sur ces arches; parmi les différentes solutions envisagées, une géomembrane de 2 mm en polyisobutylène a été retenue. Elle est appliquée directement sur le masque, sans protection externe.

Une application similaire a été réalisée en RFA, en 1974, au barrage de Heimbach, haut de 7,5 m. Une membrane PVC de 3 mm d'épaisseur a été clouée directement sur le parement amont. Les feuilles de PVC sont assemblées par solvant. La géomembrane n'est pas protégée.

En 1976, un barrage italien en maçonnerie ancien a également été réparé à l'aide d'une géomembrane. Il s'agit du barrage de Lago Miller, haut de 11 m et construit de 1925 à 1926. Des fuites importantes ont conduit à poser une géomembrane en PVC épaisse de 1,8 mm. La géomembrane n'est pas protégée bien qu'elle soit exposée à l'action de la glace et des rayons ultra violets, particulièrement importante dans ce site dont l'altitude est de 2 170 m. Des résultats obtenus sur des échantillons prélevés sur le parement amont sont très encourageants compte tenu de la longue période d'exposition.

Une autre application de géomembrane a permis de réhabiliter le barrage en béton de Lago Nero (Italie). Ce barrage, haut de 40 m, a été construit entre 1924 et 1929. Une géomembrane en PVC, épaisse de 1,9 mm a été placée sur le parement amont sans protection. Les feuilles de PVC, larges de 2,5 m, ont été mises en place selon un procédé original breveté. Le principe consiste à sceller verticalement sur

6. GEOMEMBRANES FOR THE REHABILITATION OF CONCRETE AND MASONRY DAMS

Throughout the world, a large number of existing concrete and masonry dams are showing signs of deterioration because of old age. Leakage from cracks can be very serious in such water-retaining structures, so that rehabilitation works are often necessary. The main emphasis of this Bulletin is on the use of geomembranes with embankment dams. A few examples of the use of geomembranes for rehabilitation of existing concrete and masonry dams are briefly described to illustrate this emerging application for geomembranes, which may be equally suitable for embankment dams.

6.1. TECHNIQUES USED TO DATE

An early application of a geomembrane for rehabilitation purposes was in Italy between 1969 and 1971 at the 37 m-high Lago Baitone dam. The stone masonry and cement mortar structure was built between 1927 and 1930. Waterproofing was achieved by a Levy-type face lining, consisting of a series of vertically placed semicircular concrete arches. The arches were joined along the foot by a longitudinal culvert. The deterioration of the concrete indicated the need to rehabilitate the surface of the arches. Of the various possible solutions, a 2 mm-thick lining made of polyisobutylene geomembrane was selected. The geomembrane was applied directly on the Levy arches, without any external protection.

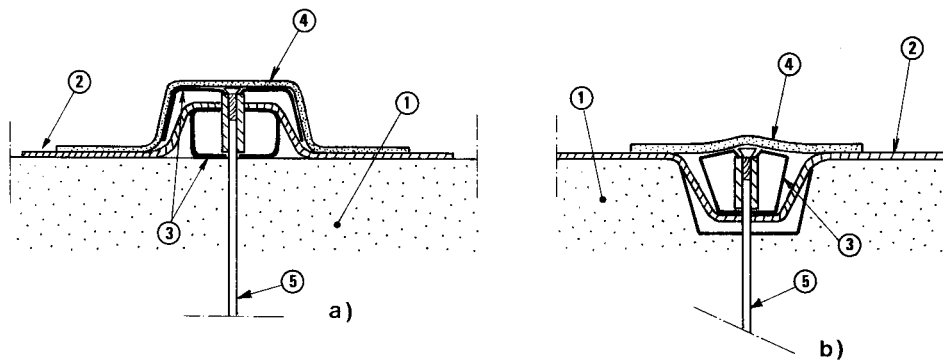
A similar application was at Heimbach dam, a 7.5 m-high concrete dam in West Germany. In 1974, a 3 mm-thick PVC geomembrane was fixed with non-ferrous nails (loose areas of 1 m²) directly onto the vertical upstream face. The PVC sheets were solvent welded. The geomembrane remained exposed, and no protection was designed.

The application of a geomembrane at an old masonry dam was carried out in Italy in 1976 at the 11 m-high Lago Miller dam, built between 1925 and 1926. Significant leakage led to the installation of a 1.8 mm-thick PVC geomembrane. In this case, the geomembrane is also unprotected so that it is exposed to the action of ice and ultra violet rays, particularly important as Lago Miller dam is located at an elevation of 2,170 m asl. The results obtained on specimens sampled regularly from the upstream facing seem very encouraging, taking into account the long period of exposure.

The third Italian installation of a geomembrane for dam maintenance purposes was in 1980/1981 at the Lago Nero concrete dam. This 40 m-high structure was built from 1924 to 1929. A 1.9 mm-thick PVC geomembrane was placed without any external protection. The 2.5 m-wide PVC geomembrane sheets were applied using a unique system, now patented, which allowed for continuous fastening along the

le parement amont du barrage des profilés métalliques inoxydables, puis à y fixer en continu la géomembrane. Ce système, qui permet d'appliquer une précontrainte horizontale à la membrane, élimine le problème du fléchissement sous le poids propre (voir figure 17a). Un géotextile polyester non tissé, de 350 g/m² de masse surfacique, est thermosoudé en usine à la géomembrane. Le premier rôle du géotextile est de protéger la géomembrane contre le poinçonnement dû à la rugosité du parement en béton, son second rôle étant d'assurer un drainage entre la géomembrane et le barrage. L'évacuation des eaux éventuellement drainées est assurée par les profilés métalliques de fixation qui disposent d'une série d'orifices, et agissent ainsi comme des exutoires de drainage. Des mesures journalières ont montré des débits de fuites au maximum égaux à 2,7 l/s, dont seulement 14 % étaient imputables à l'étanchéité par géomembrane.

D'autres applications de géomembranes pour étancher des parements amont de barrages poids ont été réalisées de manière similaire. Ainsi sur les barrages de Cignana et Piano Barbellino, les profilés métalliques étaient noyés dans une épaisseur de béton appliquée sur le parement amont (voir Fig. 17b).



Aux États-Unis, une géomembrane a été utilisée en 1987 pour étancher la partie inférieure d'un barrage en béton cyclopéen. Il s'agit du barrage de Masonry Dam, haut de 70 m. La partie supérieure du barrage, dans la zone affectée par les variations de plan d'eau, a été restaurée avec un masque de béton de 0,30 m d'épaisseur fixé au barrage par des barres scellées. La partie inférieure a été étanchée par une géomembrane en polyéthylène chloré renforcé (CPE), épaulée par un remblai de

vertical lines and also horizontal prestressing of the geomembrane itself. This system, based on stainless steel ribs, eliminated the problem of sagging caused by the weight of the geomembrane (Fig. 17 a). A polyester, needle-punched, staple fibre, non-woven geotextile (with a mass per unit area of 350 g/m²) was thermobonded to the geomembrane as part of the manufacturing process. This was to provide protection against puncturing, which could be caused by the existing coarse surface of the concrete upstream facing. The geotextile was also designed to provide a drainage function, to eliminate locally the presence of water between the concrete and geomembrane. In fact, the system of stainless steel ribs, conceived as a way of fixing the geomembrane, also serves as the main drainage system, by means of a series of small holes along the sides of the ribs themselves, acting in this way as ordinary drainage pipes. Daily measurement of the losses were taken, and the maximum total loss recorded was 2.7 l/s; only 14 per cent of the total losses was attributable to the geomembrane waterproofing system.

Other applications of PVC geomembranes to vertical upstream facings to old Italian concrete dams were performed recently with a very similar technique to the Lago Nero dam experience. In the applications to Cignana and Piano Barbellino dams, the stainless steel ribs are embedded in an extra layer of concrete placed on the upstream facing (Fig. 17 b).

Fig. 17

Horizontal Sections through Steel Rib Fastening Systems.

Schéma des fixations : coupe horizontale.

- | | |
|---|--|
| (a) Face-mounted rib (Lago Nero dam). | (a) <i>Profilé extérieur (barrage de Lago Nero).</i> |
| (b) Embedded rib (Cignana & Piano Barbellino dams). | (b) <i>Profilé noyé dans le béton (barrages de Cignana et Piano Barbellino).</i> |
| (1) Concrete. | (1) <i>Parement en béton.</i> |
| (2) PVC geomembrane. | (2) <i>Géomembrane en PVC.</i> |
| (3) Two-part steel rib. | (3) <i>Les deux parties du profilé de fixation.</i> |
| (4) PVC cover strip over rib. | (4) <i>Bande de PVC recouvrant le profilé.</i> |
| (5) Rib anchor bolt. | (5) <i>Vis de fixation du profilé.</i> |

In the United States, a recent application of a geomembrane to seal the lower portion of the Masonry dam, a 70 m-high cyclopean concrete dam, was completed in 1987. The upper section within the drawdown range of the reservoir was refaced with a 0.30 m-thick reinforced concrete facing tied to the old dam with grouted anchors. The lower portion beneath the normal drawdown range of the reservoir was sealed by attachment of a 0.90 mm reinforced chlorinated polyethylene

terre. La base du masque en béton recouvre le sommet de la géomembrane sur au moins 0,30 m pour assurer la jonction entre les deux types d'étanchéité.

Compte tenu de l'importance de ces applications, des inspections régulières sont réalisées pour vérifier que la géomembrane n'a pas subi d'altération par fléchissement ou perte de tension en particulier. Le comportement général de ces systèmes d'étanchéité s'est révélé satisfaisant jusqu'à ce jour.

Sur la base de ces résultats, de tels systèmes peuvent donc être généralisés si l'on porte une bonne attention à toutes les phases de l'installation. Compte tenu de l'absence de protection, une surveillance et un contrôle régulier des caractéristiques de la géomembrane sont indispensables.

Les caractéristiques essentielles de ces applications sont précisées en annexe 6.

6.2. PERSPECTIVES NOUVELLES : LES OUVRAGES NEUFS EN BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU

Comme pour les barrages en remblai, la technique utilisée pour des réhabilitations de barrages anciens peut être envisagée pour des ouvrages neufs. Certes, il n'est pas utile d'étancher par une géomembrane des barrages récents en béton conventionnel. Par contre, la technique du béton compacté au rouleau (BCR), actuellement en plein développement, peut faire appel aux géomembranes.

Lorsque le béton compacté au rouleau n'est pas suffisamment étanche dans sa masse, on utilise généralement des surdosages en liant côté amont ou du béton conventionnel ou préfabriqué. La mise en œuvre de géomembranes peut aussi être envisagée. Il existe en 1989 deux projets français de ce type :

— le projet du barrage du Riou : ce barrage, haut de 20 m va être construit en 1990 et étanché par une géomembrane en PVC, selon une technique semblable à celle exposée en 6.1. pour les barrages de Lago Nero et Piano Barbellino.

— le projet de barrage de la Mole : ce petit barrage est conçu avec un parement amont composé de plaques PEHD préfabriquées, emboîtées et solidarisées par des tubes emboîtables assurant un drainage. L'originalité de ce système breveté est que les plaques tiennent lieu d'étanchéité, mais aussi de coffrage du BCR.

geomembrane that was covered with an earth embankment buttress fill. The bottom of the concrete facing extended over the top of the geomembrane a minimum of 0.30 m to effect the seal between the two elements.

Because of the importance of these applications, regular inspections are carried out on site, whenever the reservoirs are drained, to ensure that no yielding or loosening of the geomembrane or any other possible alteration has taken place. The general behaviour of the lining systems has been found to be satisfactory after some years.

On the basis of the results obtained so far, the application of this system can be very suitable for maintenance purposes, if adequate attention is given to all the details of the geomembrane installation. Taking into account the fact that geomembranes in such applications are unprotected, regular monitoring and inspection of their characteristics have to be carried out.

The leading features of these applications are tabulated in Appendix 6.

6.2. FUTURE PROSPECTS : NEW ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS

As with embankment dams, the techniques used for the rehabilitation of old dams can be considered for new structures. While it would of course be unnecessary to add a geomembrane to waterproof a new dam built by conventional concrete methods, the emerging roller compacted concrete technology might well make use of geomembranes.

Where the main mass of the RCC is insufficiently impervious, extra cement is usually added to the mix towards the upstream side of the dam or conventional or prefabricated concrete is used in this area. Geomembranes could also be considered, and by 1989, two French projects incorporated this concept :

- Riou dam, a 20 m-high dam to be built in 1990, will be rendered watertight with a PVC geomembrane, using a similar technique to the one described in paragraph 6.1. above at the Lago Nero and Piano Barbellino dams.
- The small Mole dam has been designed with an upstream facing of prefabricated interlocking HDPE slabs bound together by jointed lengths of drain pipe. The innovative feature of this patented system is that the slabs act as permanent formwork to the roller compacted concrete as well as providing the watertightness.

7. CONCLUSIONS

Depuis la parution en 1981 de la première édition du bulletin 38 de la CIGB, de nouvelles réalisations ont été faites et de nombreux progrès ont été réalisés dans l'utilisation des géomembranes. Un domaine nouveau et prometteur concerne notamment la réparation des masques amont en béton.

Il convient de distinguer nettement le cas des géomembranes posées directement sur le remblai et celui des géomembranes posées sur un support rigide ou plus généralement sur un support moyennement étanche et non sensible à l'érosion interne. Dans ce deuxième cas, le matériau constitutif du support peut être un béton de ciment, un béton bitumineux moyennement dosé, du béton compacté au rouleau, etc. Par la suite, des supports ainsi constitués seront appelés « supports rigides ».

7.1. LES SUPPORTS RIGIDES

On peut accepter dans ce cas des géomembranes non revêtues. En effet, le support protège la géomembrane de plusieurs sollicitations qu'elle aurait à subir si elle était posée directement sur un remblai : risque de déchirure généralisée, soulèvement au vent, etc. De plus, en cas de défaillance, le support supplée la géomembrane en jouant le rôle de barrière hydraulique de secours. Enfin, une géomembrane non revêtue est facilement inspectable et réparable.

7.2. GÉOMEMBRANES POSÉES DIRECTEMENT SUR LE REMBLAI

Dans ce cas, on continuera pour l'instant à proposer des géomembranes revêtues, notamment pour les ouvrages importants présentant un certain risque. En effet, un certain nombre d'agressions extérieures tels que le vandalisme, les chocs de corps flottants, sont toujours préjudiciables quels que soient les progrès réalisés. Les risques alors encourus d'écoulement interne seraient trop importants. L'utilisation de géotextile sous la géomembrane constitue d'ailleurs une sécurité compte tenu de leur bonne résistance à la déchirure amorcée. On favorisera le choix d'une protection facile à enlever afin de permettre des réparations ponctuelles ou bien afin de permettre de remplacer la géomembrane après une période qui devrait aujourd'hui pouvoir dépasser une vingtaine d'années. Cela suppose bien entendu que le réservoir puisse être vidangé.

7.3. DOUBLE ÉTANCHÉITÉ

Pour les ouvrages les plus importants ou présentant des risques pour l'aval, on recommandera un système comportant deux étanchéités mécaniquement indépendantes. Si la première géomembrane est plus ou moins détruite, la destruction de la deuxième étanchéité lui supplée, même si elle est moins parfaite.

7. CONCLUSIONS

Since publication of the first ICOLD Bulletin No. 38 in 1981, there has been much progress in the use of geomembranes as well as new practical projects. A new and promising area is the repair of concrete facings.

A clear distinction must be made between geomembranes laid directly on the dam fill, and those underlain by a rigid backing, or more generally, a moderately impervious material that is insensitive to internal erosion. This backing may be concrete, moderately-lean bituminous concrete, roller compacted concrete, or the like. These can conveniently be referred to collectively as “ rigid backings ”.

7.1. RIGID BACKINGS

It is permissible to omit the protective covering if the geomembrane is laid on a rigid backing as defined above, since it provides adequate protection against any of the forms of attack associated with direct laying on fill, such as multiple tears, wind suction uplift, etc. Even if the geomembrane fails, the backing offers adequate back-up watertightness. Lastly, an uncovered geomembrane is easy to inspect and repair.

7.2. DIRECT LAYING ON FILL

Geomembranes laid directly on the dam fill should preferably be covered at the present time, especially for large dams with some degree of risk; the possibility of willful damage, impact from floating bodies, etc., is still a danger, whatever improvements may have been made in the geomembrane materials, and the resulting risk of internal seepage would be unacceptable. Laying a geotextile underlay is a safety asset by reason of its good resistance to tear growth. The overlying protection should be easy to remove for local repairs or to replace the whole geomembrane after a period of time which should, today, exceed some twenty years. This of course presupposes the reservoir can be emptied.

7.3. DOUBLE WATER BARRIER

A duplicate watertight system is recommended for the largest dams or those involving public safety. The two barriers are mechanically independent, and if the outermost geomembrane is seriously damaged or destroyed, the second barrier will remain unaffected and provide a back-up, even though it may not be entirely impervious.

Peuvent être considérées comme mécaniquement indépendantes :

- les géomembranes posées sur un support rigide, tel que défini précédemment;
- les géomembranes posées sur un remblai moyennement étanche (voir 4.1.4. b).

Par contre, une étanchéité mince recouverte d'un masque en béton par exemple ne répondrait pas à cette condition car le glissement du masque entraînerait automatiquement la déchirure de la géomembrane.

7.4. HAUTEUR LIMITE

Le précédent bulletin préconisait de limiter l'emploi de géomembranes comme étanchéité principale de barrages en remblai à des ouvrages ne dépassant pas 30 m de hauteur. Depuis sa parution, de nombreux progrès ont été faits dans la formulation des produits et dans les techniques de mise en œuvre. Les expériences concernant la réhabilitation de structures existantes sont encourageantes. La durabilité des produits et la validité des concepts de mise en œuvre ont été confirmées. Comme pour toute technologie en développement, une prudence du projeteur, de bonnes spécifications des matériaux, et un bon contrôle sont essentiels pour l'obtention d'un travail nécessitant une maintenance réduite. Il n'y a plus de raison pour recommander maintenant de limiter l'utilisation des géomembranes à des barrages d'une certaine hauteur. Le choix de l'ensemble du dispositif d'étanchéité devra prendre en compte la localisation, les caractéristiques du site, la disponibilité des matériaux de construction, les coûts et les techniques de mise en œuvre.

Un soin tout particulier devra être apporté à l'ingénierie des barrages en remblai étanchés par géomembranes dans le cas des barrages importants. Dans ce cas, une seconde étanchéité, mécaniquement indépendante de la première et pouvant faire face à une défaillance de celle-ci est recommandée.

7.5. ASPECTS ÉCONOMIQUES

Le choix du procédé d'étanchéité principale d'un barrage dépendra toujours de considérations économiques. Dans plusieurs projets, il s'est avéré utile de comparer les coûts de diverses étanchéités telles que par exemple le béton bitumineux et les divers types de géomembranes. Dans l'état actuel des procédés de mise en œuvre, les géomembranes recouvertes présentent un intérêt pour des surfaces de masque modérées. Le recours à des géomembranes non protégées pourra modifier cette considération.

**

Sous réserve de toujours envisager quel sera le comportement du barrage en cas de détérioration ou de rupture de la géomembrane, le procédé pourrait connaître un nouveau développement. Un complexe amont comportant un matériau moyennement étanche et mécaniquement résistant associé à une géomembrane paraît permettre ce développement.

Independent double barrier systems include :

- geomembrane laid on a rigid backing as described above;
- geomembrane laid on a moderately impervious embankment (4.1.4. *b* above).

A geomembrane covered by a concrete facing would not be included in this category because the membrane would necessarily be torn if the facing were to slip.

7.4. MAXIMUM HEIGHT

The earlier Bulletin recommended that fill dams relying principally on geomembranes for watertightness should not be more than 30 m high.

Since that time, there have been many advances in the formulation of geomembrane materials and engineering practice in their use. Further experience in the rehabilitation of existing dams has been encouraging. Product durability and the soundness of the basic engineering concepts have been confirmed. As in any developing technology, prudent design, good materials specifications and stringent quality control are all essential for a quality job requiring little or no maintenance. There is no reason to recommend a specific height limitation on the use of geomembranes in embankment dams. The choice of the best watertight system must consider all relevant engineering factors including the location and character of the site, availability of construction materials, costs and construction factors.

With very large structures, special care must be taken in the engineering of an embankment dam using geomembrane technology. A second watertight barrier, mechanically independent from the first and providing effective back-up, is recommended in such cases.

7.5. COST

The final decision on the type of watertight system to be used in a design will always be governed by cost. In many situations, it has been found useful to compare unit costs per unit area of various types of facings such as bituminous concrete and geomembranes. In today's practice, covered geomembranes are attractive for moderate face areas. In the future, the advent of uncovered geomembranes might alter this situation.

Always provided that designers consider the effects of damage to, or failure of the geomembrane, the technology may well be extended to larger dams. It is felt that this could come about through the adoption of upstream watertight systems combining a moderately impervious but strong material with a geomembrane.

8. REFERENCES

ICOLD PUBLICATIONS

- Bulletin No. 38, Use of Thin Membranes on Fill Dams, 1981.
Bulletin No. 55, Geotextiles as Filters and Transitions in Fill Dams, 1986.
Proc. 7th Congress, Rome, 1961, Question 27, Report 97.
Proc. 11th Congress, Madrid, 1973, Question 42, Reports 11, 22, 27, 28, 48, General Report.
Proc. 14th Congress, Rio de Janeiro, 1982, Question 55, General Report.
Proc. 16th Congress, San Francisco, 1988, Question 61, Reports 8, 15, 23, 24, 26, 31, 45, 53, 61, General Report.

INTERNATIONAL CONFERENCES AND SYMPOSIA

- Second Int. Conf. on Geotextiles, Las Vegas, USA, 1982.
Colloque sur l'Étanchéité superficielle des bassins, barrages et canaux, Paris, France, 1983.
Materials for Dams, Monte Carlo, Monaco, 1984.
Int. Conf. on Geomembranes, Denver, USA, 1984.
Second Int. Symp. on Plastic and Rubber Membranes in Civil Engineering, Liege, Belgium, 1984.
Third Int. Conf. on Geotextiles, Vienna, Austria, 1986.
Geosynthetics, New Orleans, USA, 1987.
Geosynthetics, San Diego, USA, 1989.

ARTICLES IN INTERNATIONAL JOURNALS

- J. P. GIROUD & R. FROBEL : " Geomembrane Products ", *Water Power & Dam Construction*, March 1984.
P. M. SPILLEMAECKER : " Bituminous Membranes at French Dams ", *Water Power & Dam Construction*, March 1984.
M. SALEMBIER : " Leakage Control Works at the Rouchain Dam ", *Water Power & Dam Construction*, Dec. 1984.
J. P. MARTIN & R. M. KOERNER : " Geotechnical Design Construction for Geomembrane Lined Slopes : Slope Stability ", *Geotextiles & Geomembranes*, vol. 2, No. 4, 1985.
D. CAZUFFI : « The Use of Geomembranes in Italian Dams », *Water Power & Dam Construction*, March 1987.
H. S. EADIE & I. R. MACGREGOR : " The Application of Geomembranes at Nigeria's Isanlu Dam ", *Water Power & Dam Construction*, June 1988.
H. GIRARD, S. FISCHER & E. ALONSO : " Problems of Friction Posed by the Use of Geomembranes on Dam Slopes : Examples and Measurements ", *Geotextiles and Geomembranes*, No. 9, 1990.

ANNEXES - APPENDICES

1 - Terminologie	1 - Terminology
2 - Normes d'essais	2 - Selected geomembrane standard test methods
3 - Liste des ouvrages recensés	3 - Dams incorporating geomembranes
4 - Exemples d'utilisation : barrages	4 - Examples of applications : dams.
5 - Exemples d'utilisation : réservoirs	5 - Examples of applications : reservoirs
6 - Exemples d'utilisation : réhabilitation de barrages-poids	6 - Examples of applications : rehabilitation of gravity dams
7 - Schémas	7 - Sketches

TERMINOLOGIE

D'après le Comité Français des Géotextiles et des Géomembranes

- Assemblage** : Action d'assembler, de manière étanche et durable, vis-à-vis des sollicitations de service, les lés, nappes (ou panneaux). L'assemblage se fait généralement par soudure, par adhésif ou par bande.
- Collage** : Mode d'assemblage de deux surfaces au moyen d'un matériau adhésif, liquide ou pâteux, ou sous forme de film, froid ou chaud.
- Collage par bande** : Collage consistant à intercaler un film auto-adhésif entre les surfaces à assembler.
- Couche de forme** : Couche assurant la transition entre le dispositif d'étanchéité par géomembrane et le corps du barrage.
- Couche support** : Ensemble des éléments placés entre la couche de forme et la géomembrane et pouvant avoir un rôle hydraulique (filtre et drain) ainsi qu'un rôle mécanique (répartition des efforts).
- Couvre-joint** : Bande de géomembrane mise en place par collage ou soudure, sur un joint, et destinée à en renforcer la solidité et/ou l'étanchéité.
- Dé laminage** : Séparation des couches de matière d'une géomembrane : par exemple, séparation des matériaux associés d'une géomembrane composée.
- Dispositif d'étanchéité par géomembrane** : Ensemble de composants constitué par : 1) une couche support, si nécessaire; 2) la structure d'étanchéité (géomembrane ou deux géomembranes séparées par un dispositif drainant); 3) une couche de protection éventuelle.
- Extrusion** : Procédé consistant à forcer une matière, chauffée ou non, à travers une filière de section appropriée.
- Géogrille** : Produit constitué d'une superposition ou d'un entrecroisement, ou d'un liage de fils, filaments, bandelettes, etc., et présentant une structure ouverte, les ouvertures ayant des dimensions très supérieures aux dimensions apparentes des constituants.
- Géomembrane** : Produit adapté au génie civil, mince, souple, continu, étanche aux liquides même sous des déformations en service, principalement en traction. NOTE : dans l'état actuel des techniques, les produits de faible épaisseur (inférieure à 0,5 mm) et usuellement appelés « films » ne sont généralement pas considérés comme des géomembranes.
- Géomembrane armée** : Géomembrane renforcée (voir ce terme), dont le renfort, appelé armature, est continu.
- Géomembrane composée** : Produit manufacturé formé par superposition et assemblage de plusieurs composants dont au moins une géomembrane. Les composants autres que la géomembrane ne sont pas séparables de la géomembrane sans altération de celle-ci. Ils sont constitués de couches de matière organique, ou minérale, généralement tissée, tricotée, continue ou alvéolaire, et placée au-dessus ou au-dessous de la géomembrane.

TERMINOLOGY

Based on French Geotextiles and Geomembrane Committee Usage

Seaming : Process of joining together strips (from rolls) or (prefabricated) panels by watertight seams of sufficient strength to withstand expected loads, by heat welding methods, adhesives or tape.

Glued seam : Seam made with liquid or bodied adhesive, or film applied hot or cold.

Tape seam : Seam made by inserting double-sided tape between the surfaces to be joined.

Base layer : Layer of material forming the transition between the geomembrane facing system and the body of the dam.

Supporting layer : Material placed between the base layer and the geomembrane which may act as a filter and drain as well as distributing loads.

Seam strip : Strip of geomembrane material glued or welded over a seam for increased strength and/or watertightness.

No English term : Describes separation of membrane layers, e.g. separation of components in composite geomembrane.

Geomembrane facing system : The complete facing system comprising : 1) supporting layer (if required); 2) impervious structure (geomembrane, or pair of geomembranes with drain sandwiched between); 3) overlying protective layer (if required).

Extrusion : Process in which (sometimes heated) material is forced through a die of appropriate shape.

Geogrid : Fibres, threads, strips, etc., laid parallel in a mesh pattern or at spacings much greater than their diameter or width.

Geomembrane : Thin, continuous, flexible synthetic products retaining their watertight properties even under service strains (chiefly tensile). NOTE : In the present state of technology, thin films less than 0.5 mm thick are not usually considered as geomembranes.

Geomembrane, fabric reinforced : Geomembrane reinforced with woven or non-woven fabrics during manufacture or *in situ*.

Geomembrane, composite : Manufactured multilayer product comprising at least one geomembrane layer, the other components being intimately associated with it so that the geomembrane cannot be separated without damage. The components other than the geomembrane consist of woven, non-woven, sheet or vesicular organic or mineral material above or below the geomembrane.

Géomembrane renforcée : Géomembrane dont les caractéristiques mécaniques et/ou physiques sont améliorées par un renfort placé en son sein. NOTE : les renforts utilisés peuvent être fibreux ou granulaires, en matière organique ou minérale. Ils sont très fortement liés à la matrice constituant la géomembrane. Ils peuvent être répartis uniformément dans toute la masse ou localisés dans l'épaisseur. Lorsqu'ils se présentent sous forme de nappes continues, on les appelle armatures (voir géomembrane armée).

Géosynthétique : Produit de type plan manufacturé à partir de produit polymère et utilisé en génie civil.

Géotextile : Produit ou article textile utilisé en génie civil.

Joint : Zone de liaison entre lés, nappes (ou panneaux).

Lé : Largeur de production d'une géomembrane. Par extension, bande de géomembrane. Les lés sont conditionnés en rouleaux.

Nappe (ou panneau) : Ensemble de lés assemblés de manière définitive en usine ou dans un atelier proche du site de service.

Soudure : Mode d'assemblage des surfaces amollies, soit par solvant, soit plus généralement par la chaleur. Simultanément une pression est appliquée sur les faces extérieures de l'assemblage.

Soudure par procédé diélectrique : Un champ électromagnétique à haute fréquence provoque un échauffement des deux surfaces à souder, par agitation moléculaire (voir soudure thermique).

Soudure par extrusion : Un bourrelet de matière (PEHD en général) obtenu par extrusion est placé au bord supérieur de deux lés superposés. Le lé supérieur est généralement chanfreiné au préalable.

Soudure par lame métallique : Une lame métallique chaude est placée à l'interface entre les deux lés superposés, puis retirée avant qu'une pression soit appliquée sur les faces extérieures de l'assemblage (voir soudure thermique).

Soudure par solvant/Collage : Mode d'assemblage, avec pression, de produits thermoplastiques dans lequel les surfaces sont amollies à l'aide d'un solvant, ou enduit d'un adhésif (ou les deux à la fois); le solvant s'élimine généralement par absorption et évaporation.

Soudure thermique : Mode d'assemblage avec pression dans lequel les surfaces sont amollies par la chaleur. Celle-ci génère sur les deux surfaces à souder une température élevée provoquant une fusion partielle des matériaux à souder. Cette chaleur peut être apportée par une lame métallique, un jet d'air ou un champ électrique haute fréquence. La soudure peut dans certains cas s'effectuer avec apport de matière amollie par la chaleur.

Geomembrane, strengthened : Geomembrane strengthened with fibrous or granular organic or mineral material intimately dispersed throughout, or within the thickness of the geomembrane. May take the form of fabric reinforced (see this term).

Geosynthetic : A planar product manufactured from polymeric material used with foundation soil, rock or any other related geotechnical engineering material as an integral part of a man-made project, structure or system.

Geotextile : Woven or non-woven fabric used in civil engineering.

Seam : Joints between strips or panels.

Strip : Geomembrane as delivered in standard roll width from the manufacturer.

Panel : Strips assembled in factory or site fabrication yard.

Weld : Seam produced by softening edges of strips or panels with solvent or by heat and applying pressure.

Dielectric-weld seam : Seam made by heat-welding the two surfaces together by means of the molecular excitation caused by the application of a high-frequency electromagnetic field (see thermal seaming).

Extrusion welding : Seam made by applying an extruded fillet of (usually) HDPE to the edge of the upper strip or panel of geomembrane, suitably overlapping the bottom strip or panel; the edge is usually feathered for the purpose.

Hot wedge seam : Seam made by inserting a heated metal plate between the upper and lower strips or panels and pressing the edges together after withdrawing the blade (see thermal seaming).

Solvent/adhesive : Method of joining thermoplastics by softening the surfaces with solvent and/or applying an adhesive and applying pressure. The solvent usually evaporates or is absorbed.

Thermal seaming : Method of joining by softening and partially melting the surfaces with heat and applying pressure. The heating medium is a heated metal blade, hot air or a high-frequency electric field; extra weld material may be added.

SÉLECTION DE MÉTHODES D'ESSAI POUR LES GÉOMEMBRANES
SELECTED GEOMEMBRANE STANDARD TEST METHODS

FRANCE - AFNOR : Association Française de Normalisation.

Standards applicable to geomembranes. There are no specific standards on geomembranes to date.

1 - Plastics - Matières plastiques

- NF T 51-000 (12/78) : Plastiques - Échelles préférentielles de températures et de durée d'essais. Plastics - Preferred scales of temperature and test durations.
- NF T 51-014 (12/78) : Plastiques - Atmosphères normales de conditionnement et d'essai. Plastics - Standard atmospheres for conditioning and testing.
- NF T 54-101 (10/74) : Matières plastiques - Feuilles - Présentation et dimensions - Méthodes de contrôle. Plastic sheet - Presentation and dimensions - Methods of control.
- NF T 51-063 (2/71) : Matières plastiques - Méthode de détermination de la masse volumique des produits à l'état solide à l'exclusion des produits alvéolaires. Plastics - Methods for determining the density and relative density (specific gravity) of plastics excluding cellular plastics.
- NF T 51-166 (12/81) : Plastiques - Détermination de l'absorption d'eau. Plastics - Determination of water absorption.
- NF T 54-102 (12/71) : Matières plastiques - Feuilles - Détermination des caractéristiques en traction. Plastic sheet - Determination of tensile characteristics.
- NF T 51-103 (12/71) : Matières plastiques - Essai de fluage en traction. Plastics - Determination of tensile creep.
- NF T 51-056 (4/81) : Matières plastiques - Méthode d'exposition à une lampe à arc au xénon. Plastics - Methods of exposure to a xenon arc lamp.
- NF T 51-165 (7/80) : Matières plastiques - Méthode d'exposition directe aux agents atmosphériques. Plastics - Methods of exposure to natural weathering.
- NF T 51-167 (10/73) : Matières plastiques - Détermination des pertes en matières volatiles par la méthode du charbon actif. Plastics - Determination of the loss of volatile matter by the activated carbon method.
- NF X 41-513 (8/61) : Protection des matières plastiques - 1^{re} partie - Méthode d'essai de résistance des constituants aux micro-organismes. Plastics protection - 1st Part - Test method to determine the resistance against microorganisms.
- NF X 41-514 (12/81) : Protection des matières plastiques - 2^e partie - Détermination du comportement sous l'action des champignons et des bactéries - Évaluation par estimation visuelle ou par mesurage des variations de masse ou de caractéristiques physiques. Plastics - Determination of behaviour under the action of fungi and bacteria - Evaluation by visual examination, measurement of change in mass or mechanical properties.

2 - Weatherproofing Materials - Revêtements d'étanchéité

- NF P 84-352 (3/88) : Revêtements d'étanchéité - Essai de poinçonnement statique. Waterproofing - Sheeting for roofing and dampproofing, static perforation test.
- NF P 84-363 (9/87) : Revêtements d'étanchéité - Essai de poinçonnement dynamique. Waterproofing - Sheeting for roofing and dampproofing, dynamic perforation test.

RÉPUBLIQUE FÉDÉRALE D'ALLEMAGNE
FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY
DIN : Deutsches Institut für Normung

1 - Standards on Polymeric Geomembranes - Normes concernant les géomembranes en polymère

- DIN 16 726 (12/86) : Kunststoff-Dachbahnen - Kunststoff Dichtungsbahnen. Prüfungen. Plastic roofing sheets and plastic sheets for waterproofing - Testing. Revêtements d'étanchéité en matière plastique pour toiture et contre l'humidité - Essais.
- DIN 53 370 (2/76) : Prüfung von Kunststoff-Folien - Bestimmung der Dicke durch mechanische Abtastung. Testing of plastics films - Determination of thickness by mechanical feeling. Essai de feuilles en matière plastique - Détermination de l'épaisseur par contact mécanique.
- DIN 53 377 (5/69) : Prüfung von Kunststoff-Folien - Bestimmung der Massänderung. Testing of plastics films - Determination of dimensional stability. Essai de feuilles en matière plastique - Détermination des variations dimensionnelles.
- DIN 53 495 (4/84) : Prüfung von Kunststoffen - Bestimmung der Wasseraufnahme. Testing of plastics - Determination of water absorption. Essai des matériaux plastiques - Détermination de l'absorption de l'eau.
- DIN 53 455 (8/81) : Prüfung von Kunststoffen-Zugversuch. Testing of plastics - Tensile test. Essai de matériaux plastiques - Essai de traction.
- DIN 53 363 (5/69) : Prüfung von Kunststoff-Folien - Weitereissversuch an trapezförmigen Proben mit Einschnitt. Testing of plastics films - Tear test using trapezoidal test specimen with incision. Essais de feuilles en matière plastique - Essai de déchirement à partir d'une éprouvette trapézoïdale avec une coupure.
- DIN 54 307 (1/82) : Prüfung von Textilien - Stempeldurch drück versuch. Testing of textiles - Plunger puncture test (CBR). Essai de textiles - Essai de poinçonnement (CBR).
- DIN 53 361 (6/82) : Prüfung von Kunstleder und ähnlichen Flächen gebildet - Bestimmung des Verhaltens beim Falzen in der Kälte. Testing of artificial leather and similar sheet materials - Determination of suppression at groove in coolness. Essai de cuir artificiel et de feuilles en matériau similaire - Détermination du comportement par pliage au froid.

2 - Standards on Bituminous Geomembranes - Normes concernant les géomembranes bitumineuses

DIN 52 123 (8/85) : Prüfung von Bitumen und Polymerbitumenbahnen. Testing of bitumen and polymer bitumen sheeting. Essai de feutres bitumés et bitumés polymères.

3 - Standard on Elastomer Geomembranes - Normes concernant les géomembranes élastomères

DIN 53 521 (11/87) : Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung des Verhaltens gegen Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase. Testing of rubber and elastomers - Determination of the resistance to liquids, vapours and gases. Essai de caoutchouc et d'élastomères - Détermination du comportement vis-à-vis de liquide, vapeurs et gaz.

4 - Standards Applicable to All Geomembrane Types - Normes pouvant s'appliquer à tout type de géomembrane

DIN 53 739 (11/84) : Prüfung von Kunststoffen. Einfluss von Pilzen und Bakterien. Visuelle Beurteilung - Änderung der Massen oder der physikalischen Eigenschaften. Determination of behaviour under the action of fungi and bacteria - Evaluation by visual examination or measurement of change in mass or physical properties - Détermination du comportement sous l'action de champignons et de bactéries - Examen visuel des variations de masse ou des propriétés physiques.

DIN 53 122 (7/82) : Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Platte und anderen Flächengebilden - Bestimmung der Wasserdampf durchlässigkeit - Elektrolyse Verfahren. Testing of plastic films, rubber films, paper, board and other sheet materials - Determination of water vapour transmission - Electrolysis method. Essais des feuilles en matière plastique, en caoutchouc, en papier, des pâtes et autres matériaux en feuilles - Détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau - Méthode par électrolyse.

DIN 53 373 (9/70) : Prüfung von Kunststoff-Folien - Durchstossversuch mit elektronischer Messwerterfassung. Testing of plastics - Impact penetration test combined with data recording by means of electronic devices. Essai de matières plastiques - Essai de poinçonnements avec enregistrement électronique des valeurs.

DIN 53 375 (4/72) : Prüfung von Kunststoff-Folien - Bestimmung des Reibungsverhaltens. Testing of plastic films - Test for coefficients of friction. Essai des feuilles en matière plastique - Détermination des conditions de frottement.

DIN 53 407 (12/71) : Prüfung von Kunststoffen - Bestimmung des Gewichtsverlustes von weichmacherhaltigen Kunststoffen nach dem Aktivkohle-Verfahren. Testing plastics - Determination of loss in weight of plasticized plastics by the activated carbon method. Essai des matières plastiques - Détermination de la perte de poids de plastiques plastifiés par la méthode du charbon actif.

UNITED STATES OF AMERICA - ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE

ASTM : American Society for Testing and Materials

1 - Standard Specifications for Polyethylene and Ethylene Copolymer Geomembranes

ASTM D 3020-85 : Standard Specifications for Polyethylene and Copolymer Plastic Sheeting for Pond, Canal, and Reservoir Lining. Spécifications pour les films en polyéthylène et en copolymère d'éthylène pour l'étanchéité des étangs, des canaux et des réservoirs.

2 - Standard Specifications for PVC Geomembranes

ASTM D 3083-76 (Reapproved 1980) : Standard Specification for Flexible Poly Vinyl Chloride Plastic Sheeting for Pond, Canal and Reservoir Lining. Spécifications pour les films flexibles en PVC pour l'étanchéité des étangs, canaux et réservoirs.

3 - Standard Specifications for Elastomer Geomembranes

ASTM D 3253-81 : Standard Specification for Vulcanized Rubber Sheeting for Pond, Canal and Reservoir Lining. Spécifications des films en caoutchouc vulcanisé pour l'étanchéité des étangs, canaux et réservoirs.

4 - Specific Standards (included in above Standard Specifications)

ASTM D 5 (1983) : Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.

ASTM D 297 (1981) : Standard Test Methods for Rubber Products - Chemical Analysis.

ASTM D 412 (1983) : Standard Test Methods for Rubber Properties in Tension.

ASTM D 573 (1981) : Standard Test Method for Rubber - Deterioration in an Air Oven.

ASTM D 624 (1986) : Standard Test Method for Rubber Property - Test Resistance.

ASTM D 638 (1984) : Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics.

ASTM D 648 (1982) : Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics under Flexural Load.

ASTM D 696 (1979) : Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics.

ASTM D 746 (1979) : Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastics and Elastomers by Impact.

ASTM D 751 (1979) : Standard Methods of Testing Coated Fabrics.

ASTM D 792 (1979) : Standard Test Methods for Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement.

ASTM D 882 (1983) : Standard Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting.

ASTM D 1004 (1981) : Standard Test Method for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting.

- ASTM D 1149 (1981) : Standard Test Method for Rubber Deterioration - Surface Ozone Cracking in a Chamber (Flat Specimens).
- ASTM D 1204 (1984) : Standard Test Method for Linear Dimensional Changes of Non-rigid Thermoplastic Sheeting or Film at Elevated Temperature.
- ASTM D 1238 (1982) : Standard Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.
- ASTM D 1415 (1981) : Standard Test Method for Rubber Property - International Hardness.
- ASTM D 1505 (1979) : Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique.
- ASTM D 1593 (1981) : Standard Specification for Non-rigid Vinylchloride Plastic Sheeting.
- ASTM D 1603 (1976) : Standard Test Method for Carbon Black in Olefin Plastics.
- ASTM D 1693 (1980) : Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics.
- ASTM D 1790 (1983) : Standard Test Methods for Brittleness Temperature of Plastic Sheeting by Impact.
- ASTM D 1938 (1978) : Standard Test Method for Tear Propagation Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting by a Single Tear Method.
- ASTM D 2136 (1984) : Standard Methods of Testing Coated Fabrics - Low Temperature Bend Test.
- ASTM D 2228 (1983) : Standard Test Method for Rubber Property - Abrasion Resistance (Pico Abrader).
- ASTM D 2240 (1986) : Standard Test Methods for Rubber Property - Durometer Hardness.
- ASTM D 2552 (1980) : Standard Test Method for Environmental Stress Rupture of Type III Polyethylene under Constant Tensile Load.
- ASTM D 3015 (1978) : Standard Recommended Practice for Microscopical Examination of Pigment Dispersion in Plastic Compounds.
- ASTM D 3254 (1981) : Standard Specification for Fabric-Reinforced, Vulcanized Rubber Sheeting for Pond, Canal and Reservoir Lining.
- ASTM D 3417 (1982) : Standard Test Method for Heats of Fusion and Crystallization of Polymers by Thermal Analysis.
- ASTM D 3418 (1982) : Standard Test Method for Transition Temperatures of Polymers by Thermal Analysis.
- ASTM D 3421 (1975) : Standard Recommended Practice for Extraction and Analysis of Plasticizer Mixtures from Vinyl Chloride Plastics.
- ASTM D 3767 (1983) : Standard Practice for Rubber - Measurement of Dimensions.
- ASTM D 4437 (1984) : Standard Practice for Determining the Integrity of Field Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes.
- ASTM D 4545 (1986) : Standard Practice for Determining the Integrity of Factory Seams Used in Joining Manufactured Flexible Sheet Geomembranes.
- ASTM D 4885 (1988) : Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method.

- ASTM E 28 (1982) : Standard Test Methods for Softening Point by Ring and Ball Apparatus.
- ASTM E 96 (1980) : Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.
- ASTM E 831 (1981) : Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermodilatometry.
- ASTM G 21 (1980) : Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi.
- ASTM G 22 (1980) : Standard Practice for Determining Resistance of Plastic to Bacteria.
- ASTM G 23 (1981) : Recommended Practice for Light and Water Exposure Apparatus (Carbon Arc Type) for Exposure of Non-Metallic Materials.
- ASTM G 26 (1977) : Recommended Practice for Operating Light Exposure Apparatus (Xenon Arc Type) with and without water for Exposure of Non-Metallic Materials.
- ASTM G 53 (1977) : Recommended Practice for Operating Light and Water Exposure Apparatus (Fluorescent UV Condensation Type) for Exposure of Non-Metallic Materials.

OUVRAGES RECENSÉS
DAMS INCORPORATING GEOMEMBRANES

Country Pays	Number of dams Nombre d'ouvrages	
	Reported Recensés	Cited in Bulletin Cités
Argentine/Argentina	1	0
Australie/Australia	2	1
Autriche/Austria	0	0
Belgique/Belgium	1	1
Canada/Canada	1	1
Chili/Chile	1	1
Chypre/Cyprus	13	1
Espagne/Spain	7	2
France/France	12	9
Hongrie/Hungary	0	0
Italie/Italy	9	8
Nigeria/Nigeria	3	2
Pays-Bas/Netherlands	2	1
Portugal/Portugal	1	1
RDA/GDR	1	0
RFA/FRG	2	2
Rép. Sud Africaine/South Africa	0	0
Roumanie/Romania	2	2
Royaume-Uni/UK	0	0
Tchécoslovaquie/Czechoslovakia	2	2
URSS/USSR	0	0
États-Unis/USA	9	6
Venezuela/Venezuela	1	1
Yougoslavie/Yugoslavia	0	0
24 pays/Countries	70	41

SYMBOLES/SYMBOLS

(1) Utilisation des ouvrages / Dam Purpose :

Batardeau / Cofferdam	B
Stockage d'effluents / Effluent retention	E
Hydro-électricité / Hydro power	H
Irrigation / Irrigation	I
Alimentation en eau potable et industrielle / Domestic and industrial water supply	S

(2) Type d'ouvrage / Dam Type :

Béton / Concrete	C
Terre / Earth	TE
Maçonnerie / Masonry	M
Enrochement / Rockfill	ER

ANNEXE 4

Exemples d'utilisation : BARRAGES

Nom de l'ouvrage	Année de mise en service	Pays	Utilisation (1)	CARACTÉRISTIQUE DE L'OUVRAGE			GÉOMÉBRANES UTILISÉES			COUCHES SUPPORT ET DE PROTECTION				
				Type (2)	Hauteur maximale (m)	Pente maximale	Surface de l'étanchéité 10 ³ m ²	Nature chimique	Fournisseur et dénomination commerciale	Épaisseur mm	Type de joint	Couche Support	Mise en place	Couche de protection
Contrada-Sabetta	1959	Italie	H	ER	32,5	1:1	3	Elastomère	Oppanol BA	2	Bitume chaud	Béton poreux 10 cm	Collé au béton	Dalles béton coulé en place 20 cm
Dobsina	1960	Tchécoslovaquie	H	ER	10	1:2,5	1,3	PVC	Fatra Napajedla Isofol BB	0,9	Soudé par HF	Dalles béton préfabriquées	A la main	Dalles béton
Terzaghi	1962	Canada	H	ER	55	1:3	8	PVC	Canadian Resins	0,76	Soudé par HF	Argile	Mécaniquement	Sable et pierres
Miel	1968	France	H	TE	15	1:2,5	3	Butyl	Fipec	1	Vulc. en usine	Tout venant 5-30	A la main	Rip rap 70 cm sur sable 20 cm
Kell	1971	RFA	S	TE	22	1:2,3	10	Bitume éthylène	Lucobit	2	Soudé à chaud	Sable compacté		Dalles béton
Landstejn	1973	Tchécoslovaquie	S	ER	26,5	1:2	11	PVC	Fatra Napajedla Isofol BB	1,1	Soudé par HF	Dalles béton préfabriquées	A la main	Dalles béton
Odiel	1974	Espagne	S	ER	27	1:1,3	3,1	PE, PVC	Saraloy 660	1,5	Solvant	Sable		Sable et remblai (étanchéité interne)
Sugarloaf	1976	Australie	B		19			Butyl	Leggett Rubber Co	Vulcanisé	Sable	Étendue par tracteur		Néant

APPENDIX 4

Examples of Applications : DAMS

DAM	Completed	Country	Purpose	DAM DATA			GEOMEMBRANE			SUPPORTING & PROTECTIVE LAYER				
				Type (2)	Max Height (m)	Max Slope	Facing Area 10 ³ m ²	Material	Supplier & Trade Name	Thickness mm	Seams	Supporting Layer	Method of Working	Protective Layer
Contrada-Sabetta	1959	Italy	H	ER	32.5	1:1	3	Elastomer	Oppanol BA	2	Hot bitumen	10 cm no fines conc.	Bonded to conc.	20 cm <i>in situ</i> conc. slabs
Dobsina	1960	Czechoslovakia	H	ER	10	1:2.5	1.3	PVC	Fatra Napajedla Isofol BB	0.9	HF weld	Prefab. conc. slabs	Manual	Conc. slabs
Terzaghi	1962	Canada	H	ER	55	1:3	8	PVC	Canadian Resins	0.76	HF weld	Clay	Mech.	Sand & stone
Miel	1968	France	H	TE	15	1:2.5	3	Butyl	Fipecc	1	Fact. vulc.	5-30 mm random	Manual	70 cm rip rap on 20 cm sand
Kell	1971	FRG	S	TE	22	1:2.3	10	Bitumen ethylene	Lucobit	2	Hot weld	Rolled sand		Concrete slabs
Landstejn	1973	Czechoslovakia	S	ER	26.5	1:2	11	PVC	Fatra Napajedla Isofol BB	1.1	HF weld	Prefab. conc. slabs	Manual	Concrete slabs
Odiel	1974	Spain	S	ER	27	1:1.3	3.1	PE,PVC	Saratoy 660	1.5	Solvent	Sand		Sand & fill (buried membrane)
Sugarloaf	1976	Australia	B		19			Butyl	Leggett Rubber Co.	Vulcanized	Sand	Spread by tractor		None

ANNEXE 4

Exemples d'utilisation : BARRAGES (suite)

Nom de l'ouvrage	Année de mise en service	Pays	Utilisation (1)	CARACTÉRISTIQUE DE L'OUVRAGE			GÉOMEMBRANES UTILISÉES			COUCHES SUPPORT ET DE PROTECTION				
				Type (2)	Hauteur maximale (m)	Pente maximale	Surface de l'étanchéité 10 ³ m ²	Nature chimique	Fournisseur et dénomination commerciale	Épaisseur mm	Type de joint	Couche Support	Mise en place	Couche de protection
L'Ospedale	1978	France	I	ER	26	1:1,7	4	Bitumineuse	Colas Colétanche NTP 3	5	Collage à chaud	Non tissé	A la main	Non tissé et pavés béton autobloquants 8 cm
Gardel	1979	France	I	TE	15	1:4		Bitumineuse	Colas Colétanche NTP	4	Air chaud	Sable 30 cm	Dévidoir sur bouteur	Néant
Paradela	1980	Portugal	H	ER	110	1:1,3	70		Rodio Rodimper	4	Néant	Masque béton à réparer	<i>In situ</i> : imprégnation d'un géotextile par une solution qui polymérise	Néant
Mas d'Armand	1981	France	T	ER	21	1:1,7	10	Bitumineuse	Colas Colétanche NTP 3	4	Chalumeau à gaz	Gravillon stabilisé à l'émulsion et géotextile	En 2 phases à partir d'une risberme et de la crête	Pavés béton collés sur géotextile
Colibita	1983	Roumanie	S, H	ER	47	1:1,7	7	PVC	Turda Plastic Works	0,8	Collage	Mortier de ciment 5 cm, puis géotextiles fibre de verre	Mécanisée	Dalle béton 15 cm sur polyéthylène expansé
Codole	1983	France	I	ER	28	1:1,7	16	PVC	Sommer Tersom	2	Air chaud	Émulsion bitumineuse à froid, puis géotextile		Dalles béton coulées en place sur géotextile

APPENDIX 4

Examples of Applications : DAMS (cont'd)

DAM	Completed	Country	Purpose (1)	DAM DATA				GEOMEMBRANE			SUPPORTING & PROTECTIVE LAYER			
				Type (2)	Max Height (m)	Max Slope	Facing Area 10 ³ m ²	Material	Supplier & Trade Name	Thick- ness mm	Seams	Supporting Layer	Method of Working	Protective Layer
L'Ospedale	1978	France	I	ER	26	1:1.7	4	Bitum.	Colas Colétanche NTP 3	5	Hot	Nonwoven	Manual	Nonwoven & 8 cm mortised conc. slabs
Gardel	1979	France	I	TE	15	1:4		Bitum.	Colas Colétanche NTP	4	Hot air	30 cm sand	Reel on Bulldozer	None
Paradeia	1980	Portugal	H	ER	110	1:1.3	70		Rodio Rodimper	4	None	Repaired conc. facing	Geotextile impreg. <i>in situ</i> with li- quid, cures in place	None
Mas d'Armand	1981	France	T	ER	21	1:1.7	10	Bitum.	Colas Colétanche NTP 3	4	Gas flame	Emulsion-sta- bilised gravel & geotextile	In 2 stages from berm & crest	Concrete slabs bonded to geo- textile
Colbitia	1983	Romania	S, H	ER	47	1:1.7	7	PVC	Turda Plastic Works	0.8	Glued	5 cm cement mortar + glass fibre geotextile	Mech.	15 cm conc. slab on expan- ded PE
Codole	1983	France	I	ER	28	1:1.7	16	PVC	Sommer Ter- som	2	Hot air	Cold bitumen emulsion + geotextile		<i>In situ</i> concrete slabs on geo- textile

ANNEXE 4

Exemples d'utilisation : BARRAGES (suite)

Nom de l'ouvrage	Année de mise en service	Pays	Utilisation (1)	CARACTÉRISTIQUE DE L'OUVRAGE				GÉOMÉBRANES UTILISÉES			COUCHES SUPPORT ET DE PROTECTION			
				Type (2)	Hauteur maximale (m)	Pente maximale	Surface de l'éanchéité 10^3 m^2	Nature chimique	Fournisseur et dénomination commerciale	Épaisseur mm	Type de joint	Couche Support	Mise en place	Couche de protection
Le Rouchain	1984	France	S	ER	60	1:1.4	14		Rodio Rodimper	4	Néant	Masque en béton à réparer	<i>In situ</i> : imprégnation d'un géotextile par unesolution qui polymérise	Néant
Lalande-Chitelet	1984	France	H	ER	17	1:1.7	1.7	Bitumineuse	Colas Coléanche NTP 3	5	Air chaud	Émulsion bitumineuse puis géotextile	Dévidoir monté sur pelle mécanique	Blocs béton sur géotextile
Isanlu	1986	Nigeria	S	ER	18	1:2.6	5	HDPE	Schlegel	3,5	Extrusion	Sable sur filtre sur enrochement 150 mm dmax		Rip-rap sur filtre sur sable
Jibiya	1987	Nigeria	I	TE	21,5	1:3	165	PVC	Geodam SA 20/400	2	Coin chauffant	Sable compacté		Dalles béton 8 cm géotextile
El Indio	1987	Chili	E	TE	79	1:2.6	4		Typar To63 Eva coated	5.5	Air chaud	Sable argileux compacté (2 m horizontal)	Revêtement partiel	Sable propre compacté (2 m horizontal)
Mihoesti	1989	Roumanie	S.H.	TE	25	1:2	11	PVC	Turda Plastics Works	0.8 x 2	Collage	Mortier de ciment 5 cm puis géotextile fibre de verre	A la main	Dalle béton 15 cm sur polyéthylène expansé
Valence d'Albi	1989	France	I	TE	15	1:3	2	Bitumineuse	Siplast Teranap 431 TP	4	Air chaud	Remblai	En position interne avec pente 1:2	Remblai (5 m horizontal)

APPENDIX 4

Examples of Applications : DAMS (cont'd)

DAM	Completed	Country	Purpose (1)	DAM DATA				GEOMEMBRANE			SUPPORTING & PROTECTIVE LAYER			
				Type (2)	Max Height (m)	Max Slope	Facing Area 10 ³ m ²	Material	Supplier & Trade Name	Thickness mm	Seams	Supporting Layer	Method of Working	Protective Layer
Le Rouchain	1984	France	S	ER	60	1:1.4	14		Rodio Rodimper	4	None	Repaired concrete facing	Geotextile impreg. <i>in situ</i> with liquid, cures in place	None
Lalande-Chitelet	1984	France	H	ER	17	1:1.7	1.7	Bitum.	Colas Colétanche NTP 3	5	Hot air	Bitumen emulsion & geotextile	Reel on mech. shovel	Conc. blocks on geotextile
Isanlu	1986	Nigeria	S	ER	18	1:2.6	5	HDPE	Schlegel	3.5	Extruded	Sand on filter on 150 mm rock		Rip rap on filter on sand
Jibiya	1987	Nigeria	I	TE	21,5	1:3	165	PVC	Geodam SA 20/400	2	Hot wedge	Rolled sand		8 cm conc. blocks & geotextile
El Indio	1987	Chile	E	TE	79	1:2.6	4		Typar T63 Eva coated	5.5	Hot air	Rolled clay sand (2 m horizontal)	Partial facing	2 m horiz. rolled clean sand
Mihoesti	1989	Romania	S,H	TE	25	1:2	11	PVC	Turda Plastics Works	0.8 x 2	Glued	5 cm cement mortar & glass geotex.	Manual	15 cm conc. slab on expanded PE
Valence d'Albi Fill (5 m horiz.)	1989	France	I	TE	15	1:3	2	Bitum.	Siplast Teranap 431 TP	4		Hot air	Fill	Internal membrane with 1/2 slope

ANNEXE 5

Exemples d'utilisation : RÉSERVOIRS

Nom de l'ouvrage	Année de mise en service	Pays	Utilisation	CARACTÉRISTIQUE DE L'OUVRAGE			GÉOMÉBRANES UTILISÉES			COUCHES SUPPORT ET DE PROTECTION			
				Hauteur maximale (m)	Pente maximale	Surface de l'étanchéité 10^3 m ²	Nature chimique	Fournisseur et dénomination commerciale	Épaisseur mm	Type de joint	Couche Support	Mise en place	Couche de protection
Kualapuu	1969	USA	S (1)	18	1:3	45	Butyl	Wisdom-Rubber	0.8		Couche de matériaux granuleux fins		Néant
Biesbosh	1973	Pays-Bas	S	8.5	1:4	550	Bitumineuse	Hypofors NF 1000	5	Bitume chaud	Remblai	Dévidoir sur pelle hydraulique	Ballast sableux
El Tablazo	1973	Venezuela	S	20	1:3.5	490	Bitumineuse	Hypofors NF 1210	5 (bar.) 3 (cuv.)	Soudé à chaud	Terre compactée	Déroulé à la main	Pentes : rip-rap sur polypropylène. Cuvette sable
La Coche	1975	France	H	33	1:2.5	110	PVC	Euroflor	1	Soudé à chaud	Tout-venant 50 cm	A la main	Béton drainant 20 cm et dalles BA 30 cm
Gorghiglio	1977	Italie	H	8	1:2.2	32	PVC	Sihelon CNT 2800	2	Air chaud	Non tissé polyester sur dalles béton		Néant
(E)legem	1978	Belgique	S	17	1:2.5	147	Bitumineuse	Enka Hypofors	5	Bitume chaud	Sable compacté	Dévidoir sur grue hydraulique	Dalles béton 15 cm
Cotter	1979	USA	E	40	1:3	800	Hypalon		0.9 à 1.5	Solvant	Argile compacté 45 cm		Terre 30 cm

APPENDIX 5

Examples of Applications : RESERVOIRS

RESERVOIR	Completed	Country	Purpose	RESERVOIR DATA			GEOMEMBRANE			SUPPORTING & PROTECTIVE LAYER			
				Max Height (m)	Max Slope	Facing Area 10 ³ m ²	Material	Supplier & Trade Name	Thickness mm	Seams	Supporting Layer	Method of Working	Protective Layer
Kualapuu	1969	USA	S (1)	18	1:3	45	Butyl	Wisdom-Rubber	0.8		Fine granular material		None
Biesbosh	1973	Netherlands	S	8.5	1:4	550	Bitum.	Hypofors NF 1000	5	Hot bitum.	Fill	Reel on mechanical shovel	Sand & stone
El Tablazo	1973	Venezuela	S	20	1:3.5	490	Bitum.	Hypofors NF 1210	5 (dam) 3 (res)	Hot weld	Rolled earth	Unrolled hand	Rip rap on polypropylene on slopes, sand in reservoir
La Coche	1975	France	H	33	1:2.5	110	PVC	Euroflor	1	Hot weld	50 cm random	Manual	20 cm nofines conc. & 30 cm RC slabs
Gorghiglio	1977	Italy	H	8	1:2.2	32	PVC	Sibelon CNT 2800	2	Hot air	Nonwoven polyester on conc. slabs		None
Œlegem	1978	Belgium	S	17	1:2.5	147	Bitum.	Enka Hypofors	5	Hot bitum.	Rolled sand	Reel on hydraulic crane	15 cm concrete slabs
Cotter	1979	USA	E	40	1:3	800	Hypalon		0.9 to 1.5	Solvent	45 cm rolled clay		30 cm earth

ANNEXE 5

Exemples d'utilisation : RÉSERVOIRS (suite)

Nom de l'ouvrage	Année de mise en service	Pays	Utilisation (1)	CARACTÉRISTIQUE DE L'OUVRAGE			GÉOMEMBRANES UTILISÉES			COUCHES SUPPORT ET DE PROTECTION			
				Hauteur maximale (m)	Pente maximale	Surface de l'élan-chéité 10 ³ m ²	Nature chimique	Fournisseur et dénomination commerciale	Épaisseur mm	Type de joint	Couche Support	Mise en place	Couche de protection
Mount Elbert	1980	USA	I	18	1:3	1 174	CPER		1.1	Solvant	Sol écreté à 25 mm	Manuel	Terre 30 cm
Barranco Benijos (a)	1983	Espagne	S	16.5	1:2	24	PVC		1.2		Géotextile non tissé	Manuel	Néant
Kyperrounda (b)	1985	Chypre	I	27	1:3.5	45	PVC		0.5 et 1	Solvant	Sable graveleux 10 cm		Rip-rap sur filtre
San Justo	1985	USA		25	1:2.5	190	PEHD-A		1			Dévidoir sur engin mécanique	Argile 50 cm graviers 15 cm blocs 30 cm
Castreccioni	1987	Italie	I	67	1:2.5	46	PVC	Alkor (Solvay)	1.2	Air chaud	Géotextile non tissé sur couche drainante		Non tissé, alluvions, rip-rap
Stillwater	1987	USA		45	1:2	69	PEHD		2.5	Extrusion	Sable graveleux 20 cm et géotextile		Néant

(a) et 6 autres ouvrages similaires - (b) et 12 autres ouvrages similaires.

APPENDIX 5

Examples of Applications : RESERVOIRS (cont'd)

RESERVOIR	Compl- eted	Country	Purpose (1)	RESERVOIR DATA			GEOMEMBRANE			SUPPORTING & PROTECTIVE LAYER			
				Max Height (m)	Max Slope	Facing Area 10 ³ m ²	Material	Supplier & Trade Name	Thick- ness mm	Seams	Supporting Layer	Method of Working	Protective Layer
Mount Elbert	1980	USA	I	18	1:3	1 174	CPER		1.1	Solvent	Soil scalped to 25 mm	Manual	30 cm soil
Barranco Benijos (a)	1983	Spain	S	16.5	1:2	24	PVC		1.2		Nonwoven geo- textile	Manual	None
Kyperrounda (b)	1985	Cyprus	I	27	1:3.5	45	PVC		0.5 & 1	Solvent	10 cm sand & gravel		Rip rap on filter
San Justo	1985	USA		25	1:2.5	190	HDPE-A		1			Reel on vehicle	50 cm clay 15 cm grav. 30 cm blocks
Castreccioni	1987	Italy	I	67	1:2.5	46	PVC	Alkor (Solway)	1.2	Hot air	Nonwoven geo- textile on drain layer		Nonwoven, al- luvium, rip rap
Stillwater	1987	USA		45	1:2	69	HDPE		2.5	Extrud	20 cm sand & gravel & geo- textile		None

(a) and 6 more similar structures - (b) and 12 more similar structures.

ANNEXE 6

Exemples d'utilisation : RÉHABILITATION DE BARRAGES POIDS

Nom de l'ouvrage	Année de construction	Pays	Utilisation	CARACTÉRISTIQUE DE L'OUVRAGE			GÉOMEMBRANES UTILISÉES			SUPPORT ET DE PROTECTION			
				Type (2)	Hauteur maximale (m)	Surface de l'étanchéité 10 ³ m ²	Nature chimique	Fournisseur et dénomination commerciale	Épaisseur	Année d'application	Couche Support	Liaison avec la couche support	Couche de protection
Lago Baitone	1930	Italie		M	37	3.5	PIB		2	1971			Néant
Heimbach	1974	RFA	S	C	7.5		PVC	Dynamite Nobel	3	1974		Épingles tous les m ²	Néant
Lago Müller	1926	Italie	H	M	11	1.5	PVC	Sibelon C.	1.8	1976			Néant
Lago Nero	1929	Italie	H	C	40	4	PVC	Sibelon CNT 2800	1.9	1981	Géotextile 350 g/m ²	Profils métalliques	Néant
Cignana	1928	Italie	H	C	58	10	PVC	Sibelon CNT 3750	2.5	1987	Géotextile 500 g/m ²	Profils métalliques	Néant
Piano-Barbellino	1931	Italie	H	C	69	5.5	PVC	Sibelon CNT 3100	2.5	1987	Géotextile 500 g/m ²	Profils métalliques	Néant
Mas Onry	1914	USA		C	70	0.4	CPER		0.9	1987			Terre

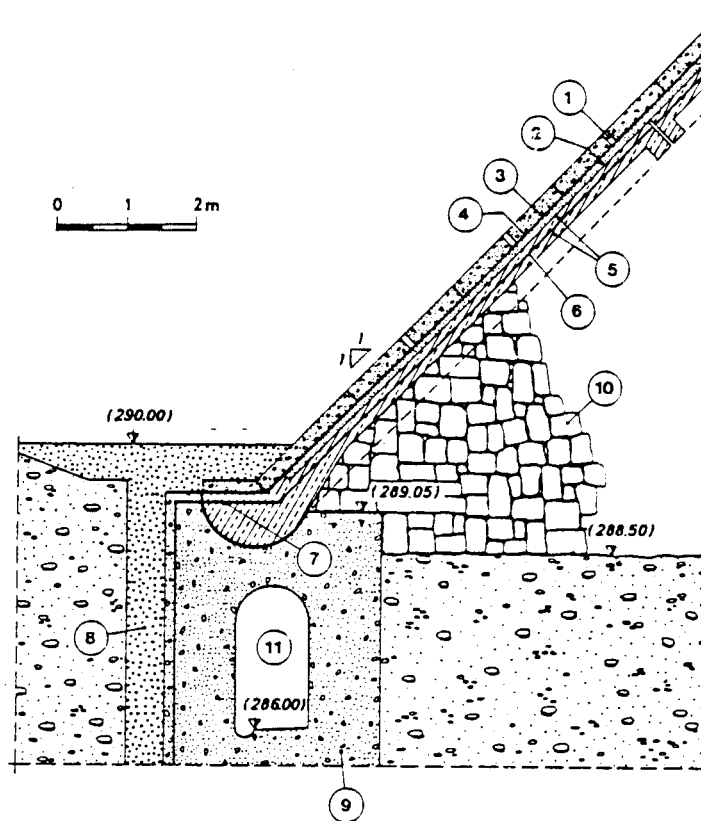
APPENDIX 6

Examples of Applications : REHABILITATION OF GRAVITY DAMS

DAM	Completed	Country	Purpose (1)	DAM DATA			GEOMEMBRANE			Repair	SUPPORTING & PROTECTIVE LAYER		
				Type (2)	Max Height (m)	Facing Area 10 ³ m ²	Material	Supplier & Trade Name	Thick- ness mm		Supporting Layer	Method of Working	Protective Layer
Lago Baitone	1930	Italy		M	37	3.5	PIB			2			None
Heimbach	1974	FRG	S	C	7.5		PVC	Dynamite Nobel		3		1 nail per m ²	None
Lago Miller	1926	Italy	H	M	11	1.5	PVC	Sibelon C.		1.8			None
Lago Nero	1929	Italy	H	C	40	4	PVC	Sibelon CNT 2800		1.9		Geotextile 350 g/m ²	None
Cignana	1928	Italy	H	C	58	10	PVC	Sibelon CNT 3750		2.5		Geotextile 500 g/m ²	None
Piano-Barbellino	1931	Italy	H	C	69	5.5	PVC	Sibelon CNT 3100		2.5		Geotextile 500 g/m ²	None
Mas Onry	1914	USA		C	70	0.4	CPER			0.9			Earth

SCHÉMAS/SKETCHES

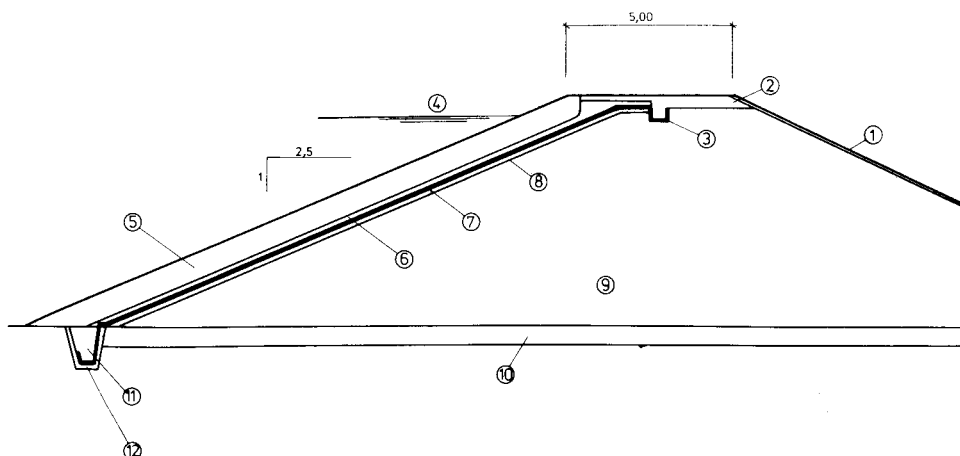
Barrage de Contrada-Sabetta (1959).	Contrada Sabetta Dam (1959).
Barrage de Miel (1968).	Miel Dam (1968).
Barrage de Landstejn (1973).	Landstejn Dam (1973).
Barrage de Odiel (1974).	Odiel Dam (1974).
Réservoir de La Coche (1975).	La Coche Reservoir (1975).
Barrage de Nérès.	Neris Dam.
Barrage de Codole (1983).	Codole Dam (1983).
Barrage de Isanlu (1986).	Isanlu Dam (1986).
Barrage de Valence d'Albi (1989).	Valence d'Albi Dam (1989).



Contrada Sabetta dam (1959)
Barrage de Contrada Sabetta (1959)

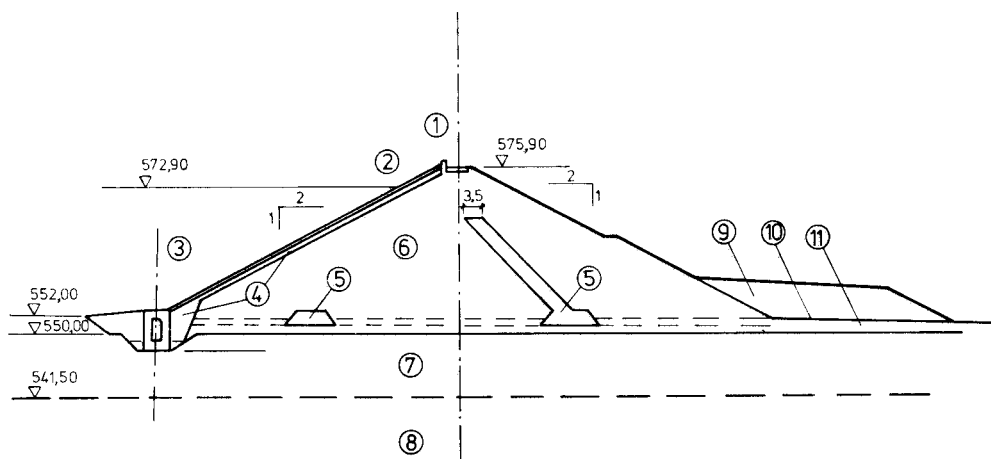
- Detail of the upstream facing.
- (1) Drain hole.
 - (2) Porous cement concrete.
 - (3) Concrete slabs.
 - (4) 1 sheet of bituminous paper-felt + 2 sheets of polyisobutylene + bituminous adhesive.
 - (5) Reinforced concrete slabs.
 - (6) PVC waterstop.
 - (7) Joint between plinth and upstream facing.
 - (8) Plastic concrete diaphragm wall.
 - (9) Concrete.
 - (10) Dry masonry.
 - (11) Inspection and drainage gallery.

- Détail du masque amont.
- (1) Drain.
 - (2) Béton poreux de ciment.
 - (3) Dalles en béton.
 - (4) 1 feuille de papier-feutre bitumineux + 2 feuilles de géomembrane en polyisobutylène + adhésif bitumineux.
 - (5) Dalles en béton armé.
 - (6) Waterstop en PVC.
 - (7) Joint entre le massif de fondation et le masque amont.
 - (8) Écran d'étanchéité en béton plastique.
 - (9) Béton.
 - (10) Maçonnerie à joints secs.
 - (11) Galerie de visite et de drainage.



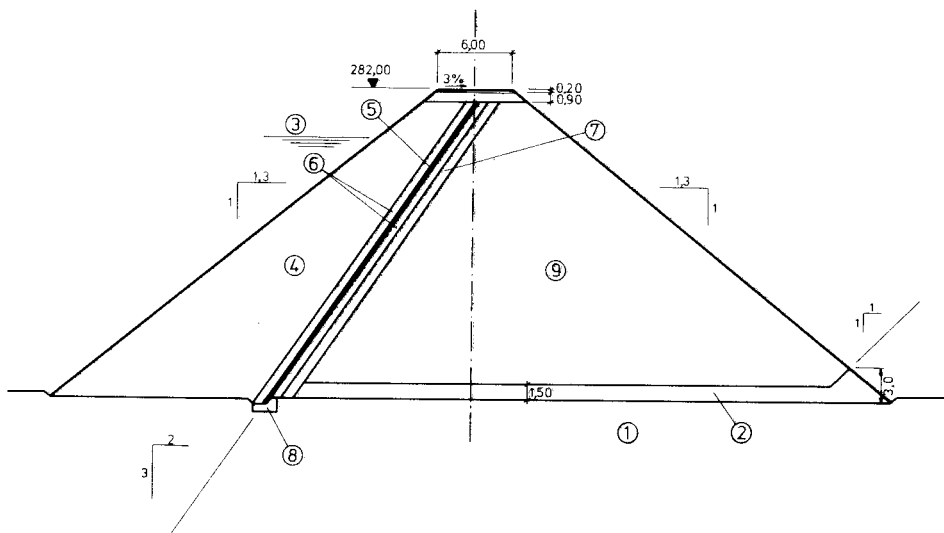
Miel dam - France (Corrèze) — Barrage de Miel - France (Corrèze)
Cross section - Coupe transversale

- | | |
|---|--|
| (1) Top soil. | (1) Terre végétale. |
| (2) Fill with grain size < 20 mm. | (2) Remblai calibré, éléments < 20 mm. |
| (3) Anchoring trench. | (3) Tranchée d'ancrage 0,40 × 0,40 cm. |
| (4) Max. water level in operating state. | (4) Cote des plus hautes eaux : 508,50. |
| (5) Rockfill. | (5) Enrochements. |
| (6) Protective layer by compacted gravel, Ø 5-30 mm, thickness 20 cm; for distress by rocks and U.V.-Radiation. | (6) Protection contre les enrochements et la lumière, gravier roulé 5/30, ép. = 20 cm. |
| (7) Butyl-revetment, 1 mm thick. | (7) Étanchéité Butyl ép. = 1 mm. |
| (8) Sand and gravel layer, 20 cm thick. | (8) Sable et gravier ép. = 20 cm. |
| (9) Compact raw gravel fill. | (9) Remblai compacté - Gorre tout-venant de ballastière. |
| (10) 1 Gravel filled drain-trench for 10 m, 50 × 50 cm, grain size 20-60 mm. | (10) 1 drain tous les 10 m, constitué par des saignées de 0,50 × 0,50, remplies de graviers 20/60. |
| (11) Cut off wall. | (11) Tranchée parafouille exécutée dans le rocher au brise béton. |
| (12) Wall lining with concrete each 300 kg cement/m ³ . Fill with concrete each 150 kg cement/m ³ . Depth up to invert 1.20 m, width below 40 cm, above 1.0 m accomplished. | (12) Revêtement des parois béton à 300 kg. Remplissage béton à 150 kg. Profondeur sur radier 1,20 m, largeur au fond 0,40, en tête, 1,00 après revêtement. |



Landstejn Dam (Czechoslovakia) — *Barrage de Landstejn (Tchécoslovaquie)*
 Cross section — *Coupe principale*

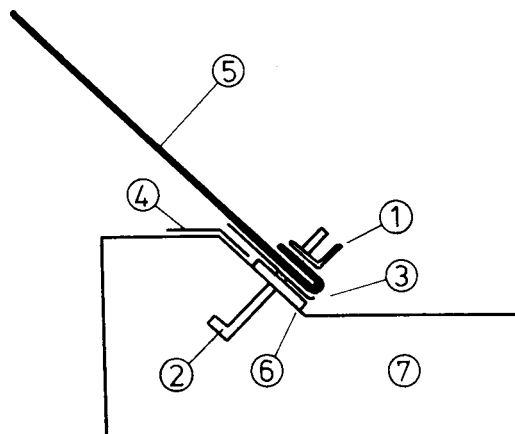
- | | |
|---|----------------------------------|
| (1) Dam axis. | (1) <i>Axe du barrage.</i> |
| (2) Maximum water level. | (2) <i>Niveau d'eau maximal.</i> |
| (3) Grouting gallery. | (3) <i>Galerie d'injection.</i> |
| (4) Macadam paving. | (4) <i>Macadam.</i> |
| (5) Continuous drain. | (5) <i>Drainage.</i> |
| (6) Weathering gneiss, like sandy gravel. | (6) <i>Gneiss.</i> |
| (7) Coarse grain with gneiss. | (7) <i>Sable grossier.</i> |
| (8) Landstejn-gneiss. | (8) <i>Landstejn-gneiss.</i> |
| (9) Toe weight. | (9) <i>Recharge de pied.</i> |
| (10) Drainage layer. | (10) <i>Couche drainante.</i> |
| (11) Sandy clay. | (11) <i>Argile sableuse.</i> |



Odiel Dam - Spain — *Barrage d'Odiel - Espagne*
 Cross section — *Coupe transversale*

- (1) Foundation area.
- (2) Zone 3 (Drainage).
- (3) Normal water level.
- (4) Zone 1 (fill).
- (5) Membrane waterproofing (Saraloy 660).
- (6) Zone A (sand).
- (7) Zone B (drain gravel).
- (8) Concrete cut off wall.
- (9) Zone 2 (fill).

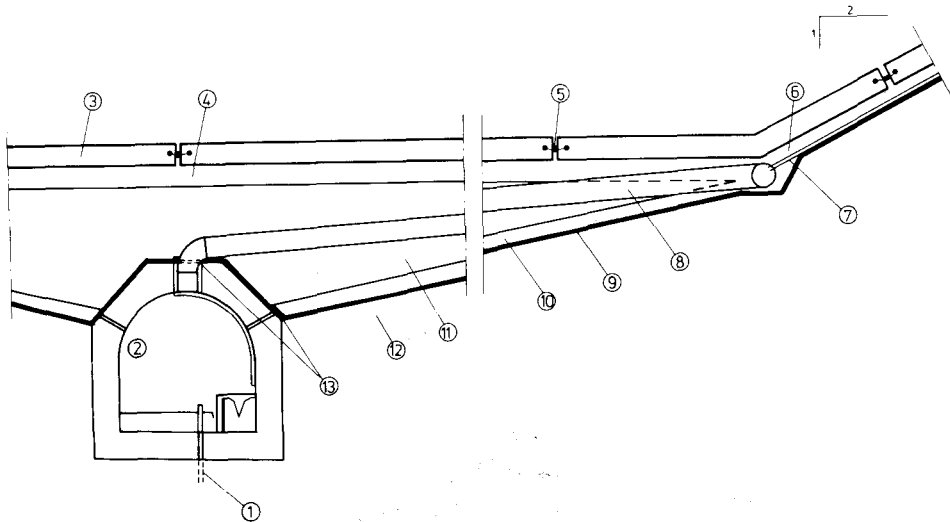
- (1) Fondations.
- (2) Zone 3 (drain).
- (3) Retenue normale.
- (4) Zone 1 (remblai).
- (5) Membrane d'étanchéité (Saraloy 660).
- (6) Zone A (sable).
- (7) Zone B (gravier filtrant).
- (8) Mur parafouille en béton.
- (9) Zone 2 (remblai).



Odiel Dam - Spain — *Barrage d'Odiel - Espagne*

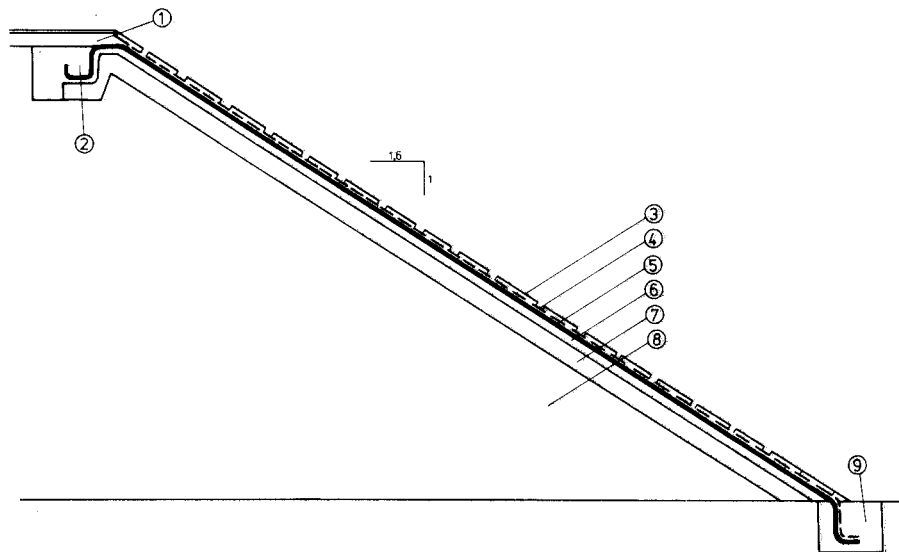
Detail of fixing of the membrane — *Détail de la fixation de la membrane*

- | | |
|--|--|
| (1) Angle iron. | (1) <i>Plaque d'acier rectangulaire.</i> |
| (2) Mooring screw. | (2) <i>Boulon d'ancrage.</i> |
| (3) Auxiliary membrane, 400 mm wide. | (3) <i>Membrane auxil. larg. 400 mm.</i> |
| (4) Auxiliary membrane, 500 mm wide, (3) and (4) are cemented with Xylene. | (4) <i>Membrane auxil. larg. 500 mm, lier 3 et 4 avec du xylène.</i> |
| (5) Membrane waterproofing (Saraloy 660). | (5) <i>Membrane d'étanchéité (Saraloy 660).</i> |
| (6) Rubber, thickness 5 mm, 140 mm wide. | (6) <i>Caoutchouc épais. 5 mm. larg. 140 mm.</i> |
| (7) Concrete cut off wall. | (7) <i>Mur parafouille en béton.</i> |



La Coche Dam - France (Savoy) — Réservoir de La Coche - France (Savoie)
 Details of drain — Détails du drainage

- | | |
|---|--------------------------------------|
| (1) Piezometers. | (1) Tubes piézométriques. |
| (2) Drainage gallery. | (2) Galerie de réception des drains. |
| (3) Reinforced concrete screens, 30 cm thick. | (3) Dalle béton armé, ép. 30 cm. |
| (4) Porous concrete for drain, 30 cm thick. | (4) Béton drainant ép. 30 cm. |
| (5) Joint sealing strip. | (5) Garniture waterstop. |
| (6) Porous concrete for drain, 20 cm thick. | (6) Béton drainant ép. 20 cm. |
| (7) Drain pipe plastered. Ø 60 mm. | (7) Tube drainant crépiné. Ø 60 mm. |
| (8) Collecting drain - plastered. Ø 280 mm. | (8) Collecteur crépiné. Ø 280 mm. |
| (9) Deep sealing (PVC). | (9) Étanchéité profonde (PVC armé). |
| (10) Transition layer. | (10) Matériaux de transition. |
| (11) Drain layer. | (11) Matériaux drainants. |
| (12) Compacted basement. | (12) Terrain de fondation compacte. |
| (13) Water collecting pipes. | (13) Collerettes. |

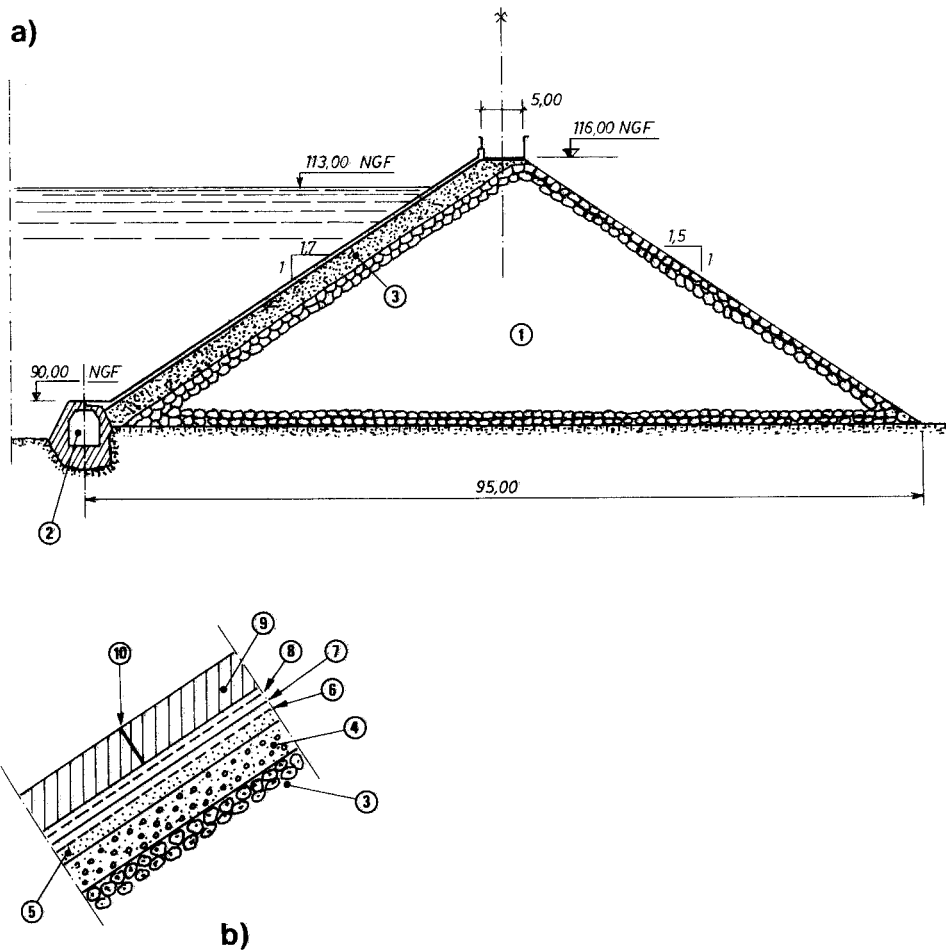


Nérès Dam - France (Allier) — *Barrage de Nérès - France (Allier)*

Scheme of revetment — *Schéma du dispositif d'étanchéité*

Cross section — *Coupe transversale*

- | | |
|---|---|
| (1) Soil. | (1) <i>Terre.</i> |
| (2) Anchor beam on the top. | (2) <i>Ancrage en crête.</i> |
| (3) Prefabricated screens 0.8 × 1.0 m, 4 cm thick. | (3) <i>Dalles préfabriquées 0,80 × 1,0 m, ép. = 4 cm.</i> |
| (4) Glass fabric (BIDIM). | (4) <i>Non tissé.</i> |
| (5) Butyl membrane, 1.5 mm thick. | (5) <i>Butyl, ép. = 15/10 mm.</i> |
| (6) Cold open-graded bituminous concrete, 3-4 cm thick. | (6) <i>Enrobé ouvert à froid, ép. = 3-4 cm.</i> |
| (7) Gravel, Ø 40-60 mm. | (7) <i>Gravier 40/60 mm.</i> |
| (8) Rockfill. | (8) <i>Enrochement.</i> |
| (9) Concrete (cut off wall). | (9) <i>Béton (mur parafouille).</i> |



Codole Dam, France (Corsica) — *Barrage de Codole - France (Corse)*

(a) Cross Section.

(b) Geomembrane Facing Detail.

(c) Crest Anchorage Detail.

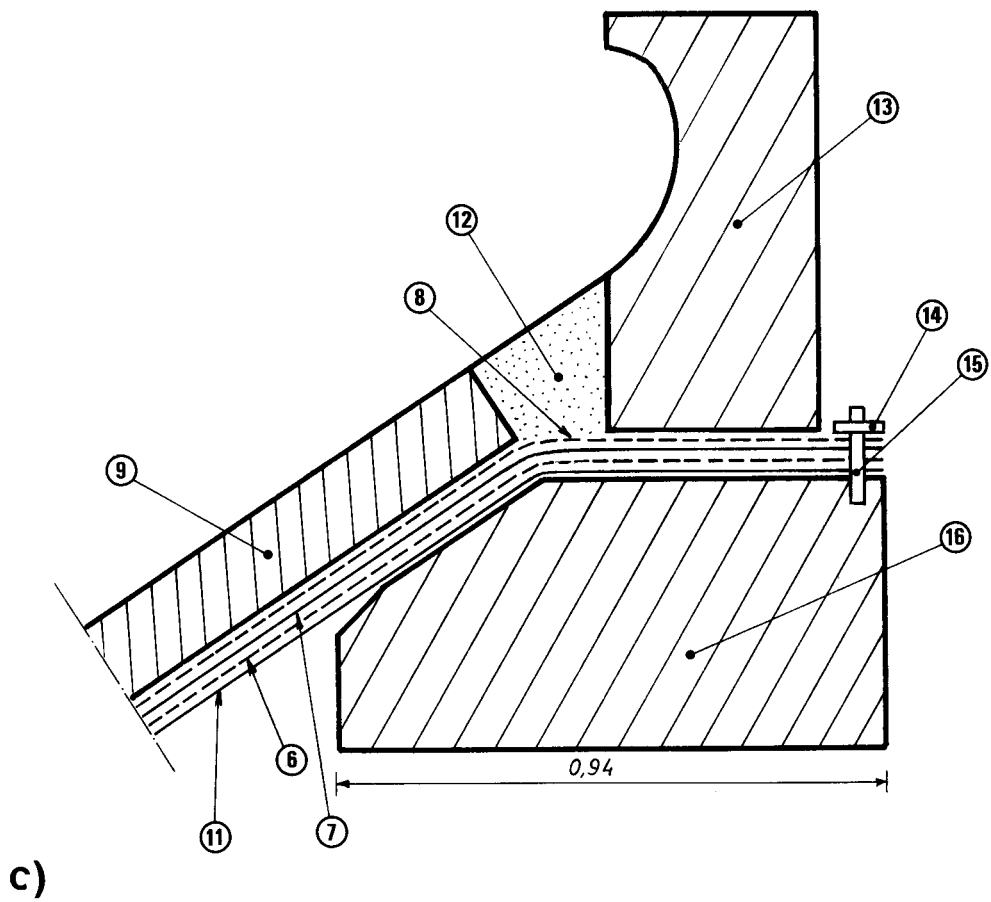
- (1) 0-1 000 mm rockfill.
- (2) Toe gallery.
- (3) 25-120 mm rolled sand and gravel, 2 m thick.
- (4) 25-50 mm gravel, 15 cm thick.
- (5) 6-12 mm cold premix, 5 cm thick.
- (6) 400 g/m² geotextile underlay bonded to geomembrane.
- (7) 2 mm PVC impervious geomembrane.

(a) *Coupe type.*

(b) *Détail dispositif d'étanchéité par géomembrane.*

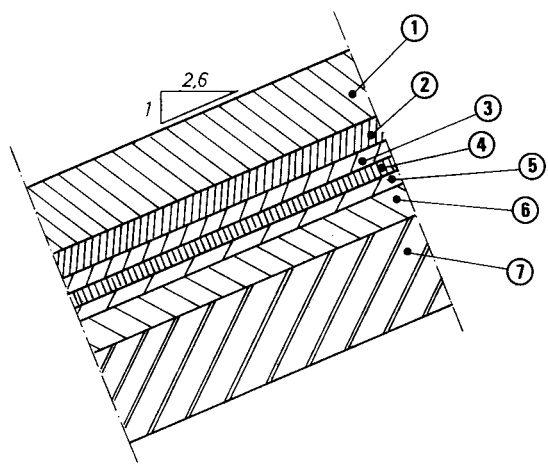
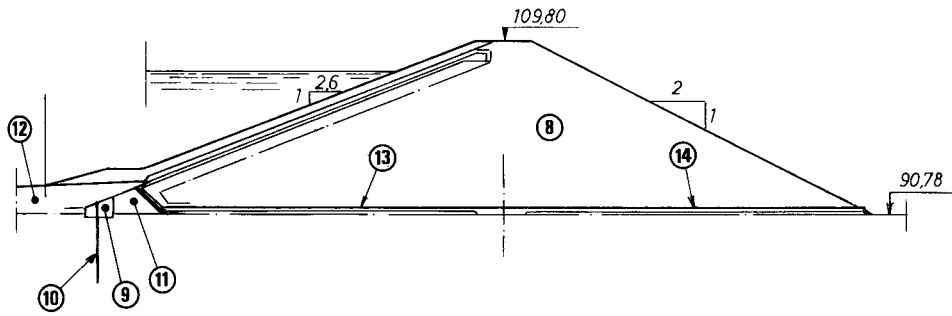
(c) *Raccordement haut.*

- (1) *Enrochements 0-1 000 mm.*
- (2) *Galerie de pied.*
- (3) *Ballast compacté 25-120 mm, épaisseur 2 m.*
- (4) *Ballast 25-50 mm, épaisseur 15 cm.*
- (5) *Enrobé à froid 6-12 mm, épaisseur 5 cm.*
- (6) *Géotextile support 400 g/m² soudé sous la membrane.*
- (7) *Membrane d'étanchéité PVC 2 mm.*



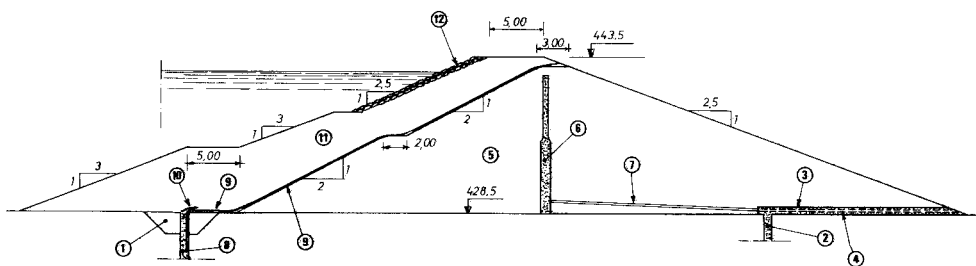
- (8) 400 g/m² geotextile overlay.
- (9) 4,5 × 5 m² concrete slabs, 14 cm thick.
- (10) Cold joint.
- (11) PVC strengthener.
- (12) Weatherproofing mortar.
- (13) Prefabricated parapet.
- (14) Galvanised steel strip.
- (15) Resin dowel.
- (16) Concrete beam.

- (8) Géotextile de protection 400 g/m².
- (9) Dalles béton 4,5 × 5 m², épaisseur 14 cm.
- (10) Joint sec.
- (11) PVC de renfort.
- (12) Mortier de fermeture.
- (13) Élément préfabriqué.
- (14) Platine acier galvanisé.
- (15) Cheville chimique.
- (16) Massif béton.



Isanlu Dam (Nigeria) — Barrage d'Isanlu (Nigeria)

- | | |
|---|--|
| <p>(a) Typical Section.</p> <p>(b) Geomembrane Facing Detail.</p> <p>(1) Rockfill, 375 mm average size.</p> <p>(2) Filter to rockfill.</p> <p>(3) Sand protection.</p> <p>(4) 3.5 mm HDPE geomembrane.</p> <p>(5) Sand supporting layer, 50 mm thick.</p> <p>(6) Coarse filter.</p> <p>(7) 0-150 rockfill transition.</p> <p>(8) Dam body (rockfill).</p> <p>(9) Concrete toe anchor beam.</p> <p>(10) Grout curtain.</p> <p>(11) Rolled impervious material.</p> <p>(12) Sorted laterite.</p> <p>(13) Multi-layer filter.</p> <p>(14) Coarse filter and drain.</p> | <p>(a) Coupe type.</p> <p>(b) Détail dispositif d'étanchéité par géomembrane.</p> <p>(1) Enrochements taille moyenne 375 mm.</p> <p>(2) Filtres pour enrochements.</p> <p>(3) Sable de protection.</p> <p>(4) Géomembrane PEHD, épaisseur 3,5 mm.</p> <p>(5) Support en sable, épaisseur 50 mm.</p> <p>(6) Filtre grossier.</p> <p>(7) Enrochements de transition 0-150.</p> <p>(8) Enrochements corps du barrage.</p> <p>(9) Bloc d'ancrage en béton.</p> <p>(10) Rideau d'injection.</p> <p>(11) Matériau imperméable compacté.</p> <p>(12) Latérite sélectionnée.</p> <p>(13) Filtre multi-couches.</p> <p>(14) Filtre grossier et drain.</p> |
|---|--|



Cross section of the Valence d'Albi Dam
Coupe schématique du barrage de Valence d'Albi - France (Tarn)

- | | |
|------------------------|--|
| (1) Cut off trench. | (1) <i>Tranchée d'ancrage.</i> |
| (2) Drainage trench. | (2) <i>Tranchée drainante.</i> |
| (3) Drainage blanket. | (3) <i>Tapis drainant.</i> |
| (4) Drainage pipe. | (4) <i>Tuyau drainant.</i> |
| (5) Initial fill. | (5) <i>Remblai première phase.</i> |
| (6) Vertical drain. | (6) <i>Drain vertical.</i> |
| (7) Pipe. | (7) <i>Exutoire.</i> |
| (8) Concrete cut off. | (8) <i>Tranchée bétonnée.</i> |
| (9) Geomembrane. | (9) <i>Géomembrane.</i> |
| (10) Overlap membrane. | (10) <i>Membrane complémentaire.</i> |
| (11) Upstream fill. | (11) <i>Remblai amont.</i> |
| (12) Riprap. | (12) <i>Enrochement antibatillage.</i> |

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : mars 1991
N° 15426
ISSN 0534-8293
Couverture : Olivier Magna

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

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



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