

# REPORT FINALE Azione 2.4a *RAPPORT FINAL Action 2.4a*

Progetto transfrontaliero Italia-Francia ALCOTRA  
*Projet transfrontalier Italie-France ALCOTRA*



# RISBA

RISCHIO DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI  
*RISQUES DES BARRAGES*



# Conception et durabilité des Dispositifs d'Étanchéité par Géomembrane (DEG) des retenues d'altitude

Guillaume STOLTZ

Marika BOUTRY

Laurent PEYRAS

# Sommaire

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL | 5 |
|----------------------------------|---|

|              |   |
|--------------|---|
| AVANT-PROPOS | 6 |
|--------------|---|

|     |                                                                 |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Typologie des retenues d'altitude                               | 6  |
| 2   | Spécificités des retenues d'altitude                            | 8  |
| 2.1 | Expression du besoin                                            | 8  |
| 2.2 | Le parc français de retenues d'altitude                         | 9  |
| 3   | Contexte du projet RISBA - Objectifs et organisation du rapport | 10 |
| 4   | La réglementation relative à la sécurité des barrages           | 11 |
| 4.1 | En France                                                       | 11 |
| 4.2 | En Région Piémont                                               | 12 |
| 4.3 | En Région Vallée d'Aoste                                        | 12 |
| 5   | Description d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG)  | 13 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| PARTIE 1 - RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES REMBLAIS ET LEUR DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE | 16 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|     |                                                      |    |
|-----|------------------------------------------------------|----|
| 1   | Dispositifs d'étanchéité rencontrés                  | 16 |
| 1.1 | Structure support                                    | 16 |
| 1.2 | Structure d'étanchéité                               | 16 |
| 1.3 | Structure de recouvrement                            | 17 |
| 2   | Raccordements de la géomembrane aux ouvrages annexes | 20 |
| 3   | Désordres mis en évidence                            | 22 |
| 3.1 | En raison de facteurs environnementaux               | 23 |
| 3.2 | En raison de défauts de conception                   | 27 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| PARTIE 2 - CONCEPTION DU DEG | 32 |
|------------------------------|----|

|     |                                                                               |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Généralités                                                                   | 32 |
| 2   | Principes généraux de conception du DEG                                       | 34 |
| 2.1 | Caractéristiques générales du DEG                                             | 34 |
| 2.2 | Principaux paramètres de conception du DEG                                    | 34 |
| 3   | Conséquences des études géologiques et géotechniques sur la conception du DEG | 35 |
| 4   | Caractéristiques géométriques des retenues étanchées par DEG                  | 36 |
| 5   | Conception de la structure support                                            | 37 |

|     |                                                                          |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 | Conception de la couche de forme                                         | 38 |
| 5.2 | Conception des dispositifs drainants sous la géomembrane                 | 39 |
| 5.3 | Conception des géotextiles anti-poinçonnants                             | 44 |
| 6   | Détermination de la structure d'étanchéité                               | 45 |
| 6.1 | Les géomembranes : définitions, familles et structures                   | 45 |
| 6.2 | Caractéristiques générales des différentes géomembranes courantes        | 47 |
| 6.3 | Caractéristiques à spécifier pour la géomembrane                         | 48 |
| 6.4 | Cas d'utilisation d'une double géomembrane                               | 49 |
| 6.5 | Méthodes de détection et de localisation de fuites dans les géomembranes | 50 |
| 7   | Structure de recouvrement                                                | 50 |
| 7.1 | Structures de recouvrement utilisées actuellement sur talus              | 50 |
| 7.2 | Géomembrane recouverte ou exposée ?                                      | 51 |
| 7.3 | Exemples de structures de recouvrement sur talus                         | 53 |
| 7.4 | Stabilité au glissement de la structure de recouvrement sur talus        | 54 |
| 7.5 | Structure de recouvrement en cuvette                                     | 55 |
| 7.6 | Protection du talus intérieur - Dimensionnement du rip-rap               | 55 |

### PARTIE 3 - DURABILITÉ DES DEG : PERFORMANCE DES DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE VIS-À-VIS DES SOLLICITATIONS DE POINÇONNEMENT

|   |                                                                                                                                                           |    |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Contexte                                                                                                                                                  | 59 |
| 2 | Protocole expérimental pour la justification de la performance d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement | 60 |
| 3 | Conclusion sur le protocole expérimental                                                                                                                  | 65 |
| 4 | Application du protocole d'essai à une campagne expérimentale                                                                                             | 65 |

### CONCLUSION & PERSPECTIVES

|   |              |    |
|---|--------------|----|
| 1 | Conclusions  | 70 |
| 2 | Perspectives | 71 |

### RÉFÉRENCES

## COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

---

Le présent rapport est une version actualisée du guide « Retenues d'altitude » [1], paru en 2009 aux éditions Quæ, sur la thématique spécifique des Dispositifs d'Étanchéité par Géomembrane (DEG). Sa coordination générale a été réalisée par Marika BOUTRY, ingénieur d'études à IRSTEA Aix-en-Provence, Guillaume STOLTZ, ingénieur de recherche au PRT (Plateforme de Recherche Technologique) géosynthétique d'IRSTEA Antony et Laurent PEYRAS (ingénieur-chercheur à IRSTEA Aix-en-Provence) avec le soutien du groupe de travail composé des membres suivants :

- Daniel POULAIN, ingénieur-chercheur à IRSTEA Bordeaux ;
- Patrice MERIAUX, ingénieur-chercheur à IRSTEA Aix-en-Provence ;
- Serge FISCHER, ingénieur d'études à IRSTEA Bordeaux ;
- Simon DIEUDONNE, ingénieur d'études à IRSTEA Aix-en-Provence ;
- Xavier PERRIN, ingénieur-stagiaire au PRT géosynthétique d'IRSTEA Antony au cours de l'année 2014 ;
- Didier CROISSANT, ingénieur d'études au PRT géosynthétique d'IRSTEA Antony.

Le groupe de travail a œuvré collectivement sur l'ensemble des recommandations nouvelles qui ont pu être faites depuis le précédent guide. Plus particulièrement, les nouveaux thèmes traités dans le rapport ont été développés à travers les contributions suivantes :

- Retour d'expérience sur les retenues d'altitude
  - Animateurs : Marika BOUTRY
  - Contributeurs : Patrice MERIAUX et Simon DIEUDONNE
- Caractérisation de la durabilité des DEG : étude du poinçonnement pour la conception des DEG
  - Animateur : Guillaume STOLTZ
  - Contributeurs : Marika BOUTRY, Xavier PERRIN, Laurent PEYRAS, Daniel POULAIN, Patrice MERIAUX, Didier CROISSANT et Serge FISCHER.

Le projet RISBA a été soutenu financièrement par le programme Européen Interreg Alcotra.

# 1 Typologie des retenues d'altitude

Les principaux types de barrages sont les barrages-poids en béton, les barrages voûtes et les barrages en remblai. Pour les retenues d'altitude, le choix du barrage en remblai s'impose du fait des principales raisons suivantes :

- contrairement aux barrages classiques, les retenues d'altitude ne se limitent généralement pas à barrer un talweg, car du fait des fortes pentes, le volume stocké serait insuffisant ; de ce fait, les sites choisis se situent souvent au droit de replats naturels et la cuvette à construire doit résulter à la fois d'un creusement et de la surélévation d'une grande partie de son pourtour ; un ouvrage en déblai-remblai s'impose alors ;
- il est en outre difficile de produire ou d'acheminer du béton en altitude, sur des sites souvent difficiles d'accès ;
- les fondations ne se prêtent pas nécessairement à la construction de barrages-poids rigides ou, encore moins, de barrages voûtes (qui ne peuvent que barrer un talweg).

Il existe différents types de barrages en remblai :

- les remblais homogènes, étanches dans leur masse ;
- les remblais zonés, disposant d'un noyau central ou d'une recharge amont étanche ;
- les remblais avec une étanchéité artificielle mince placée en amont.

Ces trois catégories de barrages en remblai sont présentes au sein du parc de retenues d'altitude, même si les remblais avec étanchéité amont sont largement majoritaires. Le choix du type de barrages en remblai dépend de deux principaux paramètres corrélés :

- la disponibilité sur site de gisements de matériaux étanches en quantité suffisante ;
- la façon dont l'étanchéité de la cuvette doit être traitée.

Le mode de traitement de l'étanchéité de la cuvette est un aspect fondamental. Classiquement, en plaine, on se trouve dans une configuration où il est possible de ramener l'étanchéité de la cuvette à celle du site. Les fuites dans la cuvette sont alors entonnées par le substratum étanche du talweg et il suffit de les barrer par un voile d'injection au droit du barrage. Cette situation se rencontre également en montagne mais elle est moins systématique. En effet, on trouve souvent des configurations où les

fuites par le fond de la cuvette peuvent échapper au talweg et rejoindre au final des talwegs adjacents. De fait, on est alors conduit en pratique à étancher toute la surface de la cuvette.

Le choix du type de barrage en remblai doit être effectué par le maître d'œuvre au vu des résultats des reconnaissances géologique et géotechnique réalisées en phase d'avant-projet. L'étude géologique de surface complétée par des sondages et essais d'eau permet de choisir entre les deux grands partis pour l'étanchéité de la cuvette. Les reconnaissances par puits accompagnés d'essais de laboratoire permettent d'apprécier la qualité des matériaux disponibles (leur fraction de fines, leur argilosité et leur homogénéité sur le site).

Les sites d'implantation des retenues d'altitude, leur topographie et leur géologie imposent souvent une étanchéité généralisée de la cuvette pour la principale raison liée au contrôle des fuites en fondation évoquée au dessus. D'autres raisons peuvent également conduire au choix d'une étanchéité artificielle de la cuvette et du remblai :

- souvent les matériaux disponibles sur site ne sont pas suffisamment étanches, du fait d'une fraction insuffisante de fines dans leur composition ;
- lorsque les matériaux disponibles pourraient être a priori suffisamment étanches, leur granulométrie est souvent très hétérogène ; il est alors difficile de réaliser avec eux l'étanchéité de l'ensemble de la cuvette et celle du remblai sans risquer des zones perméables ;
- la teneur en eau des matériaux disponibles est souvent très hétérogène, rendant la réalisation et le contrôle du compactage délicats ;
- les fondations peuvent aussi être formées de roches partiellement solubles et/ou érodables, imposant une étanchéité généralisée de la cuvette ;
- en zone de haute altitude (supérieure à 2 500 m), les phénomènes de gel du remblai, provoquant sa fissuration sous l'effet du gonflement provoqué par le gel, sont potentiellement importants et les petits ouvrages en remblai y sont particulièrement sensibles du fait d'un corps de remblai d'épaisseur limitée ;
- les effets des marnages rapides qui obligerait à des filtres sophistiqués pour garantir leur stabilité à la vidange.

Tous ces facteurs souvent rencontrés en montagne expliquent que les retenues d'altitude sont généralement conçues avec une étanchéité artificielle, posée sur le

remblai et sur l'ensemble de la cuvette du fait de leur taille limitée. La solution technique adoptée est celle du dispositif d'étanchéité par géomembrane ; c'est celle qui est décrite dans ce rapport.

## 2 Spécificités des retenues d'altitude

### 2.1 Expression du besoin

Les retenues d'altitude sont des ouvrages hydrauliques implantés dans les stations de loisirs de montagne et destinés à créer une réserve d'eau. Majoritairement, l'usage de l'eau est la production de neige de culture, mais on rencontre d'autres usages principaux ou secondaires tels le stockage d'eau brute pour la production d'eau potable, la création de plans d'eau à des fins touristiques (baignade, pêche) ou plus rarement l'irrigation. Les retenues d'altitude sont donc souvent des ouvrages à usages multiples.

L'implantation de ces ouvrages en montagne entre 1 200 et 3 000 mètres en fait indubitablement des retenues d'altitude, et non des retenues collinaires comme elles sont parfois désignées à tort, les retenues collinaires relevant d'une problématique de barrages de plaine. Cette situation entraîne des difficultés spécifiques dans toutes les phases : en conception, en réalisation, en exploitation et, s'il y a lieu, en réhabilitation. Parmi les plus importantes difficultés, on peut citer : des contextes géologiques et géotechniques complexes, des aléas spécifiques à la montagne, des dispositifs techniques parfois fragiles propres aux retenues d'altitude, une fenêtre de construction très limitée dans l'année, des sollicitations importantes par la glace, des structures soumises au froid intense, ou encore une surveillance difficile en conditions hivernales.

Les retenues d'altitude présentent également des spécificités techniques propres, dont les deux principales suivantes : (i) compte tenu des conditions topographiques en montagne, elles sont implantées sur des zones de replat, ne sont pas souvent en prise directe dans les talwegs et sont en général conçues en déblai-remblai, comme un bassin, avec un remblai les ceinturant partiellement ; (ii) compte tenu des conditions géotechniques, elles sont très souvent étanchées artificiellement par géomembrane sur l'ensemble de leur cuvette et de leurs talus. Enfin, d'un point de vue écologique, les sites de montagne sont souvent très riches, mais également fragiles. Tous ces éléments conduisent à des difficultés de faisabilité, de choix de site, de conception et de



réalisation, mais aussi à des difficultés d'exploitation et à des pathologies particulières, auxquelles les bureaux d'études et les exploitants n'ont pas nécessairement de réponses techniques adéquates. Plus encore que pour les autres barrages, les solutions sont complexes et interdisciplinaires.

À noter enfin que les ouvrages concernés sont des barrages de retenue au plan administratif (décret n°2006-881 du 17 juillet 2006) : ils barrent un bassin versant par un remblai étanche ou étanché.

## 2.2 Le parc français de retenues d'altitude

En France, le parc de barrages d'altitude est riche d'environ 120 ouvrages implantés essentiellement dans les Alpes ou les Pyrénées.

La majorité de ces barrages (45 %) possèdent des remblais de grande hauteur, supérieure à 10 m au-dessus du terrain naturel. 40 % des retenues sont de hauteur plus modeste, comprise entre 5 et 10 m, et 15 % sont de très petits ouvrages inférieurs à 5 m de hauteur.

Le volume moyen stocké est supérieur à 45 000 m<sup>3</sup> ; les ouvrages les plus récents montrent toutefois une forte augmentation de leur capacité de stockage, qui s'élève le plus souvent au-delà de 100 000 m<sup>3</sup> jusqu'à atteindre 400 000 m<sup>3</sup>.

Au regard de leur situation administrative, les retenues d'altitude françaises sont majoritairement de classe C ; seuls quelques ouvrages se situent en classe B. Les futurs projets pourraient infléchir cette répartition entre les classes en raison de l'augmentation de la taille des ouvrages et du surclassement lié à la prise en compte des enjeux à l'aval des retenues.

25 % de ces retenues sont implantées entre 1 500 et 2 000 m d'altitude, 42 % sous la cote de 1 500 m et 33 % au-dessus de 2 000 m.

### 3 Contexte du projet RISBA - Objectifs et organisation du rapport

Le projet RISBA est issu de problématiques communes sur les ouvrages de stockage d'eau en haute altitude (chaîne Alpine) situés en Italie et en France. C'est ainsi que les Régions Piémont et Vallée d'Aoste en Italie, et l'institut national de recherche IRSTEA en France, se sont associés de janvier 2013 à mars 2015 afin de partager leurs expériences et poursuivre ensemble leurs travaux sur l'amélioration de la connaissance et de la prévention des risques liés à la présence de retenues d'altitude.

L'une des thématiques commune entre les partenaires s'est révélée être celle de l'étanchéité des ouvrages, très souvent assurée par une géomembrane. Cette dernière présente néanmoins des désordres récurrents et coûteux en entretien.

En 2007 et 2008, IRSTEA a mené le projet BARALTISUR, qui a donné lieu à la publication du guide de recommandations « Retenues d'Altitude » en 2009 [1]. Ce dernier traite les différentes problématiques liées aux barrages d'altitude. Fort de cette expérience, l'Action 2.4a du projet RISBA a permis de donner des recommandations complémentaires à propos des dispositifs d'étanchéité par géomembranes de ces ouvrages. Le présent rapport, reprenant en grande partie le guide de 2009 sur ses aspects DEG, complète ainsi la partie conception du guide « Retenues d'altitude » sur la base des travaux conduits dans le projet RISBA.

Pour ce faire, des enquêtes documentaire et de terrain ont été conduites en 2013 au démarrage du projet RISBA sur un échantillon de retenues italiennes et françaises récentes. Les ouvrages enquêtés ont fait l'objet d'analyses des études de conception du dossier de l'ouvrage et de visites détaillées. Ce sont au total 22 ouvrages qui ont été examinés, permettant de rassembler des informations sur la conception, l'état, le comportement et les éventuels désordres des DEG des retenues d'altitude.

Le rapport débute par une synthèse du retour d'expérience des DEG des retenues d'altitude en « [PARTIE 1 - RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES REMBLAIS ET LEUR DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE](#) », page 16.

La « [PARTIE 2 - CONCEPTION DU DEG](#) », page 32, se focalise sur la conception des retenues étanchées par un Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane, et présente des recommandations complémentaires par rapport au guide « Retenues d'altitude ».

Enfin, la « [PARTIE 3 - DURABILITE DES DEG : PERFORMANCE DES DISPOSITIFS D'ETANCHEITE PAR GEOMEMBRANE VIS-A-VIS DES SOLLICITATIONS DE POINÇONNEMENT](#) », page 59, traite plus particulièrement la question de l'endommagement des géomembranes d'un DEG par poinçonnement : le projet vise à apporter un protocole expérimental pour justifier la résistance au poinçonnement de la géomembrane d'un DEG, compte tenu de la couche de forme granulaire et de la couche support par géotextile envisagées pour la structure support.

## 4 La réglementation relative à la sécurité des barrages

### 4.1 En France

En France, le décret n°2007-1735 du 11/12/2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques prévoit des classes d'importance décroissante A, B, C et D de barrages de retenue en fonction de critères géométriques ([Tableau 1](#)).

| Classe de l'ouvrage          | Critère(s)                                                                                   |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| A                            | $H \geq 20\text{m}$                                                                          |
| B                            | Ouvrage non classé en A et pour lequel :<br>$H \geq 10\text{m}$ et $H^2/V^{1/2} \geq 200$    |
| C                            | Ouvrage non classé en A ou B et pour lequel :<br>$H \geq 5\text{m}$ et $H^2/V^{1/2} \geq 20$ |
| D                            | Ouvrage non classé en A, B ou C et pour lequel :<br>$H \geq 2\text{m}$                       |
| Non classé au sens du décret | $H < 2\text{m}$                                                                              |

$H$  : la hauteur de l'ouvrage exprimée en mètres et définie comme la plus grande hauteur mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel à l'aplomb de ce sommet ;

$V$  : le volume retenu exprimé en millions de mètres cubes et défini comme le volume qui est retenu par le barrage à la cote de retenue normale.

Tableau 1 - Les classes de barrages de retenue en France, selon le décret du 11/12/2007

Selon ces critères géométriques, les barrages d'altitude sont essentiellement en classes C et D, et plus rarement en classe B.

Les barrages de retenues sont soumis à autorisation dès lors qu'ils relèvent des classes A, B ou C (décret 93-743 du 29 mars 1993 modifié) et, pour ceux qui relèvent de la classe D, dès lors qu'ils barrent le lit mineur d'un cours d'eau. Une large majorité des projets de retenues d'altitude relève donc d'une procédure d'autorisation prévoyant notamment une enquête publique.

Les barrages d'altitude de classes A et B doivent faire l'objet d'une étude de dangers (décret du 11 décembre 2007 et arrêté du 12 juin 2008). L'étude de dangers constitue une analyse de risques de l'ouvrage qui explicite les risques auxquels l'ouvrage est soumis et sa fiabilité. Pour les projets de retenue d'altitude de classes A et B, l'étude de dangers fait partie intégrante du dossier d'autorisation. Pour les ouvrages en service, l'étude de dangers des barrages de classe A devait être réalisée avant le 31 décembre 2012, celle des barrages de classe B avant le 31 décembre 2014. Elle devra ensuite être actualisée au moins tous les dix ans.

## 4.2 En Région Piémont

En Région Piémont, le classement des ouvrages de type D ("petits barrages et réservoirs", par opposition aux barrages de types L "barrages écrêteurs de crues" et T "barrage mobiles") se fait également sur la base de critères géométriques (Tableau 2).

| Classe de l'ouvrage | Critère(s)                                                                   |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| A1                  | $H \leq 5\text{m}$ et $V \leq 10\,000\text{m}^3$                             |
| A2                  | $H \leq 10\text{m}$ et $V \leq 30\,000\text{m}^3$                            |
| B                   | $H \leq 10\text{m}$ et $30\,000\text{m}^3 < V \leq 100\,000\text{m}^3$       |
| C                   | $10\text{m} < H \leq 15\text{m}$ ou $10^5\text{m}^3 < V \leq 10^6\text{m}^3$ |
| Géré par l'État     | $H > 15\text{m}$ ou $V > 10^6\text{m}^3$                                     |

Tableau 2 – Système de classification des ouvrages piémontais

## 4.3 En Région Vallée d'Aoste

En Région Vallée d'Aoste, la détermination de la classe de l'ouvrage se base sur l'évaluation des enjeux humains et économiques situés à l'aval de l'ouvrage (Tableau 3). Les quatre retenues valdotaines relèvent de la catégorie A.

| Classe de l'ouvrage | Critère(s)                                                                                                                                                               |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A                   | Risque ÉLEVÉ<br>pertes humaines et dommages économiques importants                                                                                                       |
| B                   | Risque MODÉRÉ<br>conséquences environnementales graves ou pertes économiques conséquentes (dommages sur structures commerciales ou industrielles, services publics, ...) |
| C                   | Risque FAIBLE<br>pertes économiques et environnementales négligeables                                                                                                    |
| Géré par l'État     | $H > 15\text{m}$ ou $V > 10^6\text{ m}^3$                                                                                                                                |

Tableau 3 – Système de classification des ouvrages valdotains

## 5 Description d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG)

Les DEG se composent de trois structures distinctes superposées : la structure support, la structure d'étanchéité et la structure de recouvrement (Figure 1 - selon [1], p.137). Si les deux premières couches sont indissociables, la mise en place de la dernière reste en revanche à l'appréciation du maître d'œuvre. Chacune a un rôle bien défini :

- la structure support peut associer une couche de forme et une couche support : la première correspond à une épaisseur de matériaux granulaires destinée à lisser les irrégularités du terrain naturel, tandis que la seconde comporte généralement un ou plusieurs géosynthétique(s) perméable(s) qui peuvent remplir les fonctions de séparation, de filtration, de drainage, ou de protection de la géomembrane ;
- la structure d'étanchéité comporte au moins une géomembrane. Dans le cas d'une conception par simple étanchéité, la géomembrane assure seule l'étanchéité de la retenue ;
- la structure de recouvrement, dite aussi de protection, réunit l'ensemble des couches géosynthétiques et granulaires placées au-dessus de la géomembrane pour la protéger des sollicitations extérieures.

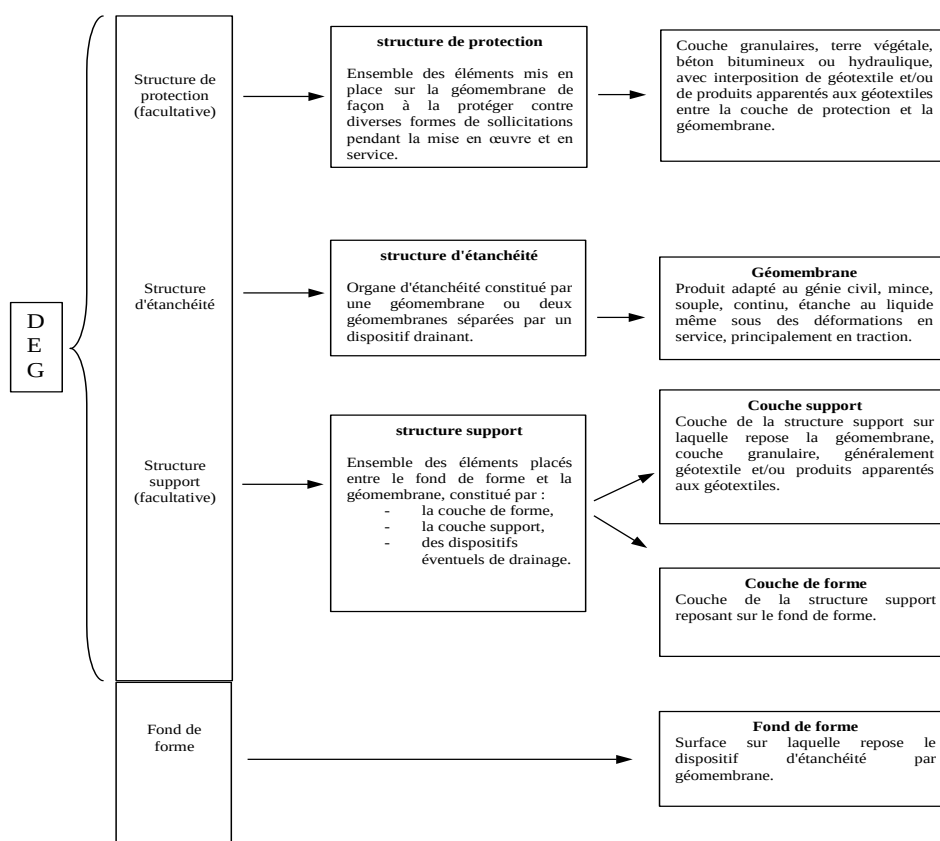


Figure 1 - Définition d'un Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane\* (norme NFP 84-500)

- \* Dans la suite du texte, le terme « structure de protection » est remplacé par « structure de recouvrement », ceci afin d'éviter la confusion qui pourrait être faite avec la fonction de protection qui peut tout aussi bien être assurée par les matériaux placés sous ou sur la géomembrane.

Un exemple de DEG complet est donné ci-après (Figure 2 - selon [1], p.141) ; il est composé des éléments suivants de la structure support vers la structure de recouvrement :

- une structure support qui comprend
  - une couche de forme granulaire S1, éventuellement stabilisée à l'aide de ciment ou de bitume (type sables à graves avec un Dmax de 20 mm s'il n'est pas mis en place une deuxième couche granulaire au dessus - point 3 ci-après), posée sur le fond de forme et assurant une fonction anti-poinçonnante. Si les matériaux du sol sont trop grossiers, il est alors nécessaire de prévoir une transition granulométrique conduisant à superposer deux couches granulaires ;
  - un géotextile filtrant S2 ;
  - un géocomposite de drainage S4 ou une couche drainante de granulats S3 (sables à graves 5/20 mm, pouvant participer aux fonctions de drainage et d'anti-poinçonnement, voire les assurer) ;
  - un géotextile anti-poinçonnant S5 placé sous la géomembrane ;

- une structure d'étanchéité G assurée par la géomembrane ;
- une structure de recouvrement qui comprend
  - un géotextile anti-poinçonnant R1 placé au-dessus de la géomembrane pour protéger celle-ci des matériaux sus-jacents ;
  - une couche de granulats R2 (sables à graves 5/20 mm) participant à la fonction d'anti-poinçonnement ;
  - une couche d'enrochement R3, de taille généralement décimétrique.

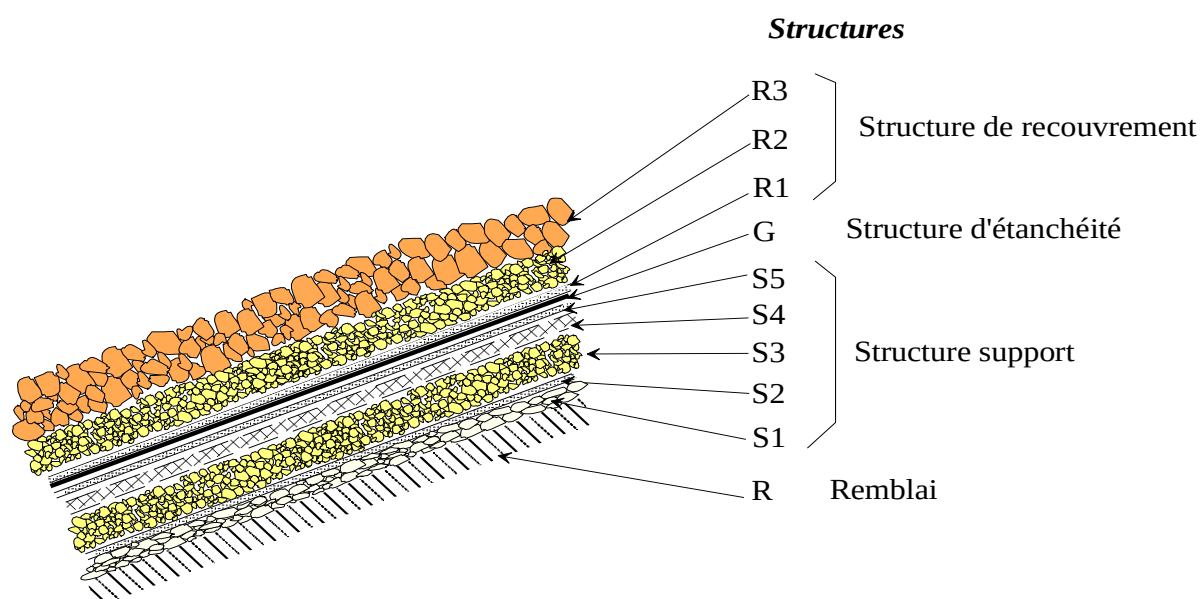


Figure 2 - Exemple de DEG avec une structure support adaptée à des matériaux de fond de forme agressifs et des matériaux de remblai semi-perméables

## PARTIE 1 - RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES REMBLAIS ET LEUR DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE

---

Cette partie détaille le retour d'expérience sur les remblais et leur Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG). Nous passerons en revue, dans un premier temps, les différents géosynthétiques mis en place sur site, puis les dommages qui ont pu être constatés sur ceux-ci.

### 1 Dispositifs d'étanchéité rencontrés

Le retour d'expérience a été l'occasion d'étudier chacune de ces trois couches sur 22 ouvrages étanchés par géomembrane (11 en France et 11 en Italie). Nous analysons ici les données qui ont été relevées sur le terrain ainsi que dans les dossiers de ces ouvrages.

#### 1.1 Structure support

En France, seuls quelques ouvrages indiquent l'existence d'une couche de forme : dans ce cas, les documents font état de la mise en place d'un matériau de type 0/31,5 mm, accompagné d'éperons ou de masques drainants placés au droit des venues d'eau. Le guide « Retenues d'altitude » évoquait pour sa part un Dmax de 20 mm ([1], p.141), éventuellement stabilisé au ciment ou au bitume en particulier sur talus si la pente est raide.

La couche support présente pour sa part différentes configurations : le plus souvent, la géomembrane repose sur un géocomposite drainant et de protection (ou anti-poinçonnant) de 1000 à 1200 g/m<sup>2</sup>, remplacé par l'association d'un géosynthétique de drainage et d'un géotextile de protection de 900 à 1200 g/m<sup>2</sup> dans certaines retenues. Plus rarement, les ouvrages sont équipés d'un géotextile de protection de 1200 g/m<sup>2</sup> sans géosynthétique dédié au drainage lorsque le terrain naturel sous-jacent est lui-même capable d'assurer cette fonction.

#### 1.2 Structure d'étanchéité

L'enquête de terrain conduite avec les partenaires italiens et les gestionnaires d'ouvrage fait apparaître que les géomembranes en PVC sont la solution la plus souvent mise en œuvre dans les retenues valdotaines et piémontaises.



En France, la même tendance se dégage. Au cours de l'enquête réalisée dans le cadre du projet BARALTISUR, la répartition se faisait quasi-équitablement entre les géomembranes PEHD (28%), PVC (24%), PP (24%) et EPDM (19%). L'analyse des dommages selon les types de membrane révélait que la solution PEHD était aussi celle la moins bien adaptée aux retenues d'altitude en raison de sa rigidité.

L'enquête réalisée dans le cadre du projet RISBA révèle l'absence de PEHD et EPDM, au profit des géomembranes en PVC (PolyChlorure de Vinyle Plastifié) : ces dernières équipent 64% des retenues visités, dont 70% sont en PVC-P simple et 30% en PVC-P armé (Figure 3). Le PP-F (PolyPropylène Flexible) a été rencontré sur un seul des barrages visités. Pour finir, une retenue fait figure d'exception avec sa double étanchéité réunissant VLDPE (Very Low Density PolyEthylene) en partie inférieure et PVC en partie supérieure. Il peut être noté que les épaisseurs des géomembranes sont variables : entre 1,5 mm et 2 mm pour le PVC-P armé, 2 mm pour le PVC-P simple ou encore 1,2 mm pour le VLDPE.

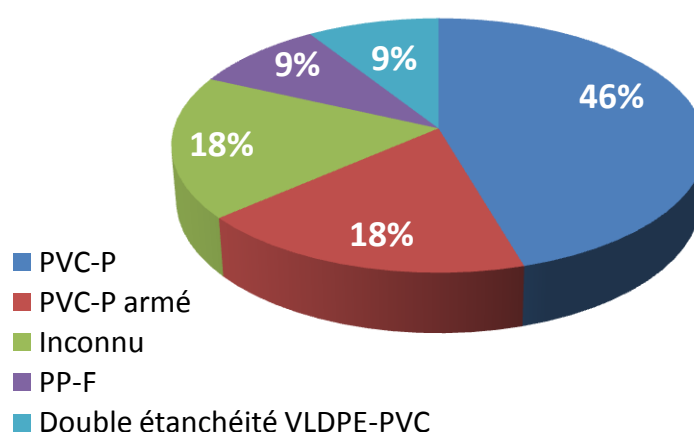


Figure 3 - Répartition des ouvrages français selon la nature de leur géomembrane

### 1.3 Structure de recouvrement

Quatre types de structure de recouvrement (ou structure de protection) ont été rencontrés : l'absence de recouvrement (exemple en Figure 4a), le recouvrement partiel sur risberme (exemple en Figure 4b), le recouvrement sur l'ensemble du parement amont, et le recouvrement total des parements et de la cuvette.

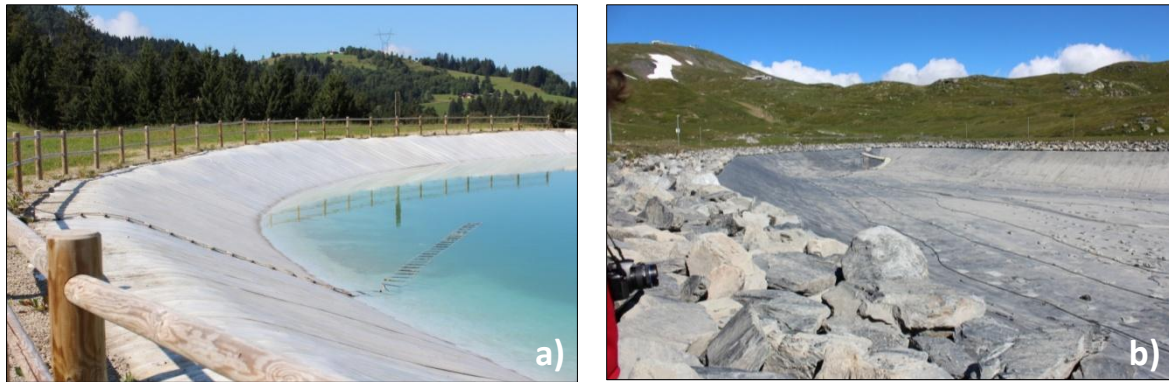


Figure 4 – Exemple a) d'absence de structure de protection  
b) de recouvrement en partie supérieure sur risberme

L'Italie et la France se distinguent cependant quant au choix du recouvrement de leurs retenues d'altitude.

La presque totalité des ouvrages italiens (10 sur 11) se trouve dans la configuration d'un recouvrement partiel en partie supérieure du parement amont, reposant sur une risberme large au minimum d'un mètre. Seule une retenue n'est pas recouverte et ne possède pas de risberme. En Région Vallée d'Aoste, le recouvrement est systématiquement fait d'enrochements de taille métrique qui reposent sur une chaussette de géotextile remplie de matériaux fins afin de ne pas blesser la géomembrane sous-jacente (Figure 5). Une retenue présente la particularité d'être revêtue de végétation rase au dessus de la cote RN afin d'en faciliter l'intégration paysagère. Une autre voit ses enrochements en limite de risberme être maintenus entre eux à l'aide d'un câble (Figure 6).



Figure 5 – Photos illustrant les “chaussettes” de géotextile  
mises en place sur les retenues Valdôtaines



Figure 6 – Enrochements métriques en bord de risberme reliés par câble

En Région Piémont, la mise en évidence de la nature de la couche de protection de la géomembrane vis-à-vis des blocs supérieurs s'est avérée plus difficile, puisque les visites se sont déroulées à retenue pleine. Seul un ouvrage montre la présence d'un géotextile, doublé localement. Pour ce qui est de la nature des matériaux sus-jacents, trois cas ont été rencontrés :

- couverture avec des blocs au maximum pluri-décimétriques (3 retenues sur 6) ;
- partie supérieure du parement végétalisée, relayée par des rochers décimétriques à pluri-décimétriques sur la risberme (2 retenues sur 6) ;
- partie supérieure du parement végétalisée, relayée par des gabions en partie médiane, puis par des pavés autobloquants sur la risberme (1 retenues sur 6).

En France, les configurations sont plus variées et évoluent là aussi vis-à-vis de la précédente enquête. Lors du projet BARALTISUR, 71% des retenues présentaient un recouvrement partiel, 19% aucune structure de recouvrement, et 10% un recouvrement total ([2], p.67). L'enquête réalisée dans le cadre du projet RISBA met en évidence une nette progression du recouvrement total (55%), suivi par le recouvrement partiel en partie supérieure sur risberme (27%). Les solutions de recouvrement sur l'ensemble du parement amont (9%) ou d'absence totale de protection (9%) ont été plus rarement rencontrées.

Le guide « Retenues d'altitude » préconisait le recouvrement total de la géomembrane pour les grands ouvrages et les petites retenues exposées à des effets de gel

importants ([1], p.150). L'application d'une couverture totale pour les ouvrages situés à plus de 1800 m d'altitude (et donc potentiellement exposé à des conditions météorologiques sévères en saison hivernale) est presque toujours respectée : une retenue présente un recouvrement sur l'ensemble du parement amont à une altitude de 2500 m, et une seconde un recouvrement partiel sur risberme à 2200 m. À l'opposé, aucune corrélation entre la taille de l'ouvrage et la présence ou non d'une structure de recouvrement n'a pu être vérifiée : il semblerait que ce choix de conception dépende davantage de l'expérience du maître d'œuvre.

La structure entre la géomembrane et les matériaux de recouvrement est pratiquement toujours la même : elle est généralement constituée d'un géotextile de protection de 700 à 1200 g/m<sup>2</sup>, associé ou non à un système d'accroche des terres (ou géoconteneur alvéolaire). Les matériaux mis en œuvre sont très hétérogènes, de type 300/500mm pour les blocs les plus gros à 0/50mm pour les plus petits.

La Figure 7 donne la répartition de l'ensemble des 36 ouvrages selon leur structure de recouvrement :

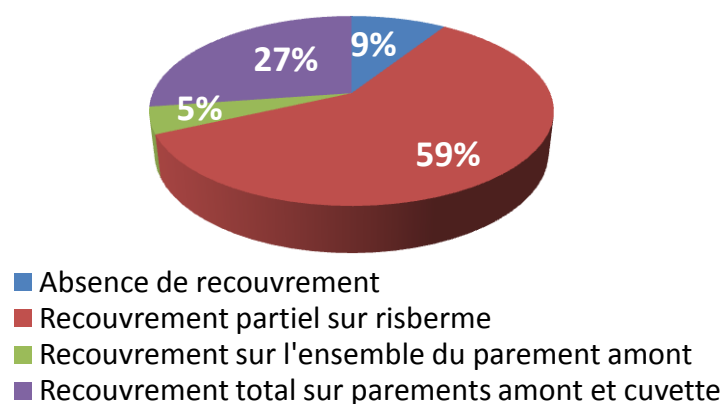


Figure 7 - Répartition des ouvrages selon leur structure de recouvrement

## 2 Raccordements de la géomembrane aux ouvrages annexes

Les raccordements les plus faciles à observer sont ceux à l'évacuateur de crues. En présence d'une structure de recouvrement totale, les raccordements en France ne sont peu ou pas visibles. Deux retenues témoignent néanmoins de difficultés quant à la mise en place de ces zones de transitions importantes pour l'étanchéité de



l'ouvrage. Dans les deux cas, le raccordement est fait en limite couronnement-parement amont, sur le béton de l'évacuateur, et est assuré par une barre métallique fixée à intervalles réguliers. On note cependant des cas de déchirures (Figure 8a, cas d'un géotextile), ou d'autres où se pose la question de l'efficacité réelle du raccordement lorsque celui-ci se trouve immergé (Figure 8b).

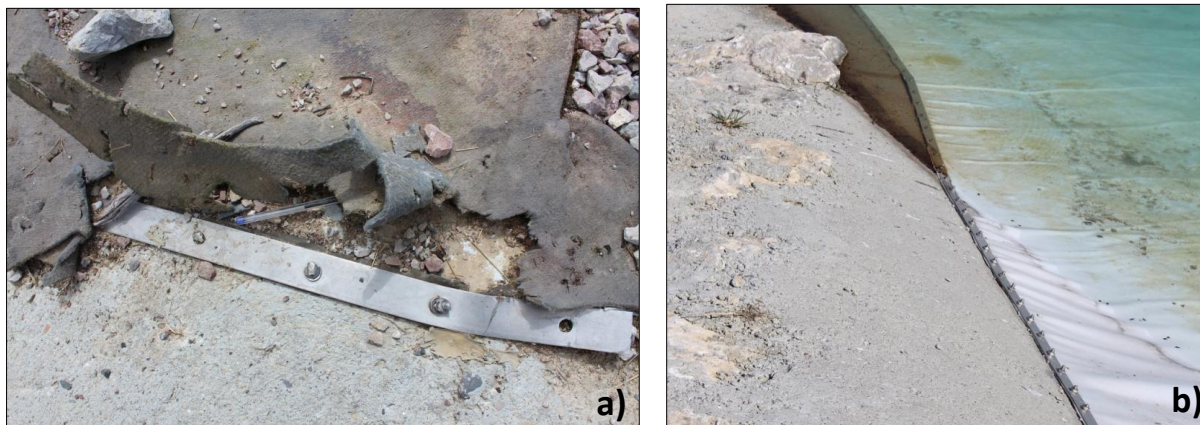


Figure 8 – Exemple de raccordement du DEG à des évacuateurs de crue en France

En Italie, à l'inverse des retenues en France, les évacuateurs de crues sont en partie ou totalement recouverts de géomembrane. Différentes manières de fixer cette dernière au béton ont été observées. Trois sont illustrées ci-dessous :

- Figure 9a : la géomembrane est maintenue en partie haute de la buse de l'évacuateur à l'aide de rondelles ovales fixées par des vis ; l'infiltration d'eau sous le géosynthétique n'est possible que si le niveau d'eau atteint cette limite ;
- Figure 9b : la géomembrane est maintenue en partie haute des bajoyers de l'évacuateur à l'aide d'une pâte qui assure également une fonction de joint ;
- Figure 9c : si l'on ignore si la géomembrane est fixée à l'évacuateur (et de quelle manière dans ce cas), le maintien d'un géotextile au-dessus est en revanche assurée par des pierres pluridécimétriques. Cette configuration peut toutefois être difficilement considérée comme une solution pérenne.



Figure 9 – Exemples de raccordement du DEG à des évacuateurs de crue en Italie

### 3 Désordres mis en évidence

Le rapport de retour d'expérience BARALTISUR évoquait deux principaux facteurs d'endommagement de la géomembrane : la glace et l'agressivité du support sous la structure d'étanchéité. Nous verrons que le recensement des endommagements du DEG dans le cadre des visites du projet RISBA ne déroge pas à cette règle. On peut toutefois noter que si l'un ou l'autre de ces deux éléments peuvent être à l'origine de dégradations, ils restent le plus souvent associés dans les endommagements observés : nous essayerons néanmoins de traiter les désordres dus aux facteurs environnementaux indépendamment de ceux dus à des défauts de conception.

### 3.1 En raison de facteurs environnementaux

#### DÉCHIRURES DE LA GÉOMEMBRANE

Ce phénomène est souvent associé à la formation de glace dans les ouvrages pourvus d'une structure de recouvrement partielle, reposant sur une risberme : lorsque le niveau de la retenue s'abaisse, la glace tend à glisser sur les parements ou à se décrocher brutalement du rip-rap sur lequel elle s'était fixée. Cela peut également s'accompagner d'une déstructuration du confinement, dont les blocs, pris dans la glace, peuvent chuter dans la retenue. S'ensuivent des déchirures de grande ampleur, métriques pour les plus importantes (Figure 10). Les anciens désordres de ce type sont également décelables lorsque la remise en état de l'étanchéité de l'ouvrage a nécessité des réparations de grande taille. Trois des retenues visitées ont été identifiées comme présentant ou ayant pu présenter par le passé ce type d'endommagement.



Figure 10 – Exemples de déchirures récentes et anciennes

#### ARRACHEMENTS DU DEG

Les retenues Valdôtaines présentent la particularité de posséder une ou plusieurs rampe(s) d'accès au fond de la retenue afin d'en faciliter l'accès pour le nettoyage ou la réhabilitation de la géomembrane. Trois types de rampe ont été rencontrés :



- des dalles de béton reposant sur un coussin de géotextile rempli de matériaux fins, et maintenues entre elles par des câbles ancrés en crête (Figure 11) ;
- des dalles de béton reposant sur des tapis de PVC recyclé et maintenues entre elles par des câbles ancrés en crête (Figure 11b) ;
- des enrochements maintenus dans une matrice de béton (Figure 11c).



Figure 11 – Exemples de structures de protection de la géomembrane vis-à-vis des rampes d'accès

Deux ouvrages, équipés respectivement du premier et du second type de rampe, présentent des désordres. Ceux-ci se trouvent confrontées à la formation d'une épaisse couche de glace en hiver, provoquant un surpoids sur la rampe et une fragilisation des câbles, conduisant ensuite au glissement de la structure en fond de retenue. En découle la mise en tension de la géomembrane lorsque les câbles résistent (Figure 12), ou l'endommagement de l'ensemble du DEG s'ils cèdent (Figure 13). La récurrence de ce problème a conduit à la suppression de la rampe d'une retenue.

La dernière configuration semble quant à elle exempte de désordres : le site d'implantation de l'ouvrage reste toutefois moins sujet aux congères ; il serait donc nécessaire de tester cette conception dans d'autres conditions pour conclure à sa résistance.





Figure 12 – Mise en tension de la géomembrane et dégradation de la rampe d'accès suite au glissement de cette dernière en fond de retenue



Figure 13 – Rupture des câbles et de la rampe : endommagement de l'ensemble de la rampe et du DEG sous-jacent

#### GLISSEMENT DU PAREMENT AMONT DU REMBLAI

Les ouvrages dont les pentes des parements sont trop raides sont prédisposés à ce type de sinistre (voir section « [3.2 Désordres mis en évidence en raison de défauts de conception](#) », page 27). Toutefois, le surpoids provoqué par la formation de glace en hiver peut constituer l'élément déclencheur, donnant lieu à une traction de la géomembrane telle que l'on assiste à la rupture de la clé d'ancrage en crête.

Plusieurs indices caractéristiques ont pu être notés sur une retenue : géomembrane lâche ([Figure 14a](#)) ; fissure longitudinale sur le couronnement (rupture de la clé d'ancrage - [Figure 14b](#)) ; surplomb de la risberme en raison de la migration des matériaux sous-jacent en fond de retenue ; bourrelet en pied de parement suite à l'arrivée des matériaux amont. Des travaux de réhabilitation de la clé d'ancrage et de réduction de la pente du parement amont étaient à l'étude lors de la visite.



Figure 14 – Glissement du parement amont (a) avec rupture de la clé d'ancrage (b)

Une seconde retenue semble être sujette au même phénomène, mais de manière superficielle : l'irrégularité de la rupture de pente entre la risberme et le parement amont situé au-dessous suggère en effet des déplacements de matériaux en fond de retenue ([Figure 15](#)).





Figure 15 – Irrégularité de la structure support sous la géomembrane laissant supposer des instabilités superficielles locales

## 3.2 En raison de défauts de conception

### POINÇONNEMENT ET PERFORATION

Les problématiques de poinçonnement et de perforation de la structure d'étanchéité figurent parmi les plus récurrents (au moins 6 des 11 retenues italiennes). Une retenue piémontaise présentait 130 trous réparés en 2008 et de 180 trous réparés en 2010. Ces phénomènes, bien que pouvant être aggravés par des conditions météorologiques extrêmes en hiver, sont attribués à la présence d'un support agressif sous la géomembrane. Dans la plupart des cas vus sur site, l'absence d'une couche de régalinge faite de matériaux de granulométrie adaptée. Dans d'autres cas, la stabilité de la couche support est précaire : elle évolue en fond de retenue en raison de la pente prononcée du parement amont.

La détection de ces désordres est facilitée en cas de géomembrane nue ou partiellement protégée. Ainsi, des blocs de roches saillants, parfois de plusieurs décimètres, peuvent être mis à jour (Figure 16). Le recouvrement total, souvent privilégié sur les ouvrages en France, n'a pas permis d'observer ce type de dommages.



Figure 16 – Poinçonnement (pointé par une flèche) et perforation de la géomembrane par un bloc anguleux de taille importante

### STABILITÉ DU PAREMENT

La rupture de la clé d'ancrage en raison de la présence de glace a déjà été abordée en section « 3.1 Désordres mis en évidence en raison de facteurs environnementaux », page 23. Toutefois, les conditions météorologiques aggravent dans la plupart des cas une configuration de l'ouvrage qui le prédisposait à subir ce type de désordre : c'est le cas des pentes de parement amont abrupts. La mise en place d'une structure de recouvrement partielle sur risberme est également susceptible d'encourager ce phénomène en créant une surcharge en tête de glissement (Figure 17).



Figure 17 – Mise à nu du béton de la tranchée d'ancrage

### CIRCULATION D'EAU

Dans le cas d'un recouvrement total de la géomembrane, la présence de traces d'infiltration non interceptée par le réseau de drainage peut révéler une défaillance de l'étanchéité, un défaut dans le raccordement du DEG aux ouvrages annexes ou une anomalie lors de la réalisation de ces derniers.

Les ouvrages parcourus n'ont que très rarement révélés ce type de désordre et nous n'avons pas observé de fuites directes sur le remblai aval. Seul le cas présenté ci-dessous est à recenser : bien que les jours précédents la visite aient été pluvieux, les dépôts de calcite accompagnant les fissures transversales qui parcourent la surface bétonnée de l'évacuateur de crues attestent de circulations régulières (Figure 18).



Figure 18 – Traces de circulation d'eau sur un évacuateur de crue

#### CHOIX DES MATÉRIAUX DE RECOUVREMENT

Le cas d'un ouvrage au recouvrement essentiellement constitué de fines (matériaux pour partie argileux) a pu être rapporté. En plus des conséquences sur la qualité de l'eau que cela engendre (eau trouble si battillage ou bullage - Figure 19), le colmatage des géosynthétiques assurant la fonction de drainage ou des drains eux-mêmes n'est pas à exclure.



Figure 19 – Eau trouble en raison de la forte proportion de fines

#### SITUATIONS POTENTIELLEMENT AGRESSIVE POUR LA GÉOMEMBRANE

Certaines configurations ont été jugées potentiellement agressives pour la géomembrane, bien qu'aucun dommage n'ait été noté. Nous dressons ici une liste non exhaustive de détails à surveiller pouvant conduire à un endommagement de l'étanchéité de la retenue :

- l'utilisation de gabions pour la structure de recouvrement nécessite une bonne qualité des cages métalliques (Figure 20a) : lorsque le tressage des fils de fer est défaillant, il existe un risque de griffure des géosynthétiques sous-jacents ;
- un mauvais lestage du géotextile protégeant la géomembrane vis-à-vis des matériaux du confinement peut amener à la chute de matériaux potentiellement blessants dans la retenue (Figure 20b) ;
- l'utilisation de pavés autobloquants pour la structure de recouvrement nécessite une couche support adaptée : en association avec un géotextile en mauvais état, la blessure de la géomembrane sur la risberme est probable. De même, un risque de poinçonnements ou de déchirures existe en cas de basculement en fond de retenue (Figure 20c) ;
- la qualité des sacs de lestage est à contrôler afin d'éviter qu'ils ne s'éventrent : selon la nature, la granulométrie et l'angularité des matériaux qu'ils contiennent, la blessure de la géomembrane est possible (Figure 20d) ;
- etc.





Figure 20 – Illustrations de situations à risque

### 1 Généralités

Les géomembranes sont utilisées avec succès depuis plus de 40 ans pour assurer l'étanchéité de différents types d'ouvrages hydrauliques : barrages, bassins, canaux, etc. La réparation du masque amont du barrage en enrochements de CONTRADA-SABETTA en Italie (1959), de 32,5 mètres de hauteur, est souvent citée comme étant la première utilisation d'une géomembrane dans ce domaine [3] ; en France, on peut rappeler l'étanchement par une géomembrane (caoutchouc butyle) du barrage de MIEL en Corrèze construit en 1967 [4].



Figure 21 - Vue générale d'une retenue d'altitude étanchée par une géomembrane

La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), a édité un guide sur l'utilisation des géomembranes dans les barrages intitulé « Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages - Principes de conception et retour d'expérience » [5]. Ce document, qui intègre les résultats d'une enquête de retour d'expérience sur environ 250 ouvrages et présente en détail les géomembranes et leurs conditions d'utilisation, s'applique également aux petites retenues d'altitude et doit constituer une référence essentielle du concepteur.

Il est fréquemment fait référence par la suite au guide SETRA « Étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier » [6]. Ce guide fixe des valeurs seuils pour les caractéristiques spécifiées, mais il faut considérer qu'il concerne des bassins destinés à stocker des hauteurs d'eau faibles (quelques mètres) très inférieures à celles des ouvrages traités ici ; les valeurs spécifiées dans le guide

SETRA constituent donc des valeurs qui doivent être adaptées aux sollicitations propres de la retenue considérée.

Les géosynthétiques (géomembranes, géotextiles et produits apparentés) sont souvent utilisés de façon complémentaire pour constituer des solutions à part entière, techniquement et économiquement compétitives, et non plus seulement des solutions variantes. Dans les ouvrages hydrauliques, les géosynthétiques sont utilisés aussi bien pour des ouvrages neufs que pour la réhabilitation d'ouvrages anciens :

- les géomembranes assurent la fonction d'étanchéité ; elles remplacent des solutions plus anciennes d'étanchéités minces telles que les masques en béton de ciment et en béton bitumineux, les tapis argileux et plus rarement les injections ;
- les géotextiles et produits apparentés, matériaux perméables, qui remplissent notamment des fonctions de séparation, drainage, filtration, renforcement et protection des géomembranes ; ils se substituent à des matériaux granulaires élaborés.

Les étanchéités par géomembrane sont des solutions d'étanchéité fiables, à condition, comme toute technique, d'être, d'une part, bien étudiées, bien conçues, bien réalisées et, d'autre part, bien suivies et bien entretenues. Les différentes phases de la vie d'un DEG ([Figure 1](#)) vont être examinées successivement dans la suite du rapport.

Pour les retenues d'altitude, comme dans tous les ouvrages, la géomembrane n'est pas utilisée seule : elle fait partie d'un Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG). C'est le DEG qui est dimensionné pour répondre aux objectifs d'étanchéité de l'ouvrage et non la géomembrane uniquement. La [Figure 1](#) donne la définition normalisée d'un DEG. Outre les matériaux constituant ses différentes structures, le DEG inclut également les assemblages des différents lés ou panneaux de géomembrane, les raccordements de la géomembrane aux ouvrages (notamment arrivées d'eau, évacuations, etc.) et les ancrages. Les différents matériaux géosynthétiques utilisés dans les DEG sont décrits au fur et à mesure du texte.

Parmi les matériaux géosynthétiques à fonction d'étanchéité, il faut mentionner les géosynthétiques bentonitiques qui ne seront pas traités dans ce document ; ces matériaux sont très peu ou pas utilisés dans le domaine des retenues d'altitude. Ils sont d'un développement plus récent que les géomembranes et diffèrent en particulier de celles-ci par leur nature minérale, leur fonctionnement et leur comportement sur pente.

On mentionne uniquement que, malgré leur apparente facilité d'emploi, il ne faut pas négliger le fait qu'ils nécessitent une couche de confinement, que leur support doit être de très bonne qualité, que leur utilisation sur pente doit être conçue avec soin et que leur mode d'obtention de l'étanchéité est particulier (humidification après confinement). Ces caractéristiques amènent à déconseiller leur usage pour les retenues d'altitude qui connaissent des cycles de gel-dégel intenses ainsi que des marnages importants et des périodes de mise à sec longues, peu compatibles avec ce type de matériau, sauf cas spécifiques nécessitant une conception et des précautions particulières. Toute information détaillée sur cette famille de matériaux peut être notamment obtenue dans le fascicule N°12 du CFG [7].

## 2 Principes généraux de conception du DEG

### 2.1 Caractéristiques générales du DEG

Le maître d'ouvrage définit ses besoins, avec le concours du maître d'œuvre, en particulier la durée de vie attendue du DEG et les conditions d'exploitation (alimentation, curage, circulation d'engins par exemple).

### 2.2 Principaux paramètres de conception du DEG

Le DEG doit assurer l'étanchéité à l'eau de l'ouvrage et la conserver sous les sollicitations de service. Avant d'aborder chronologiquement la description de sa conception, sont donnés ci-après les principaux paramètres à prendre en compte qui sont liés :

- au support :
  - planéité et portance du fond de forme ;
  - présence d'éléments agressifs ;
  - tassements du support ;
  - pentes de fond ;
  - nappe phréatique à proximité (risques de sous pressions) ;
  - présence de matières fermentescibles ;
  - arrivées d'eau sur les talus ;
  - présence de cavités.
- à la pente des talus :
  - stabilité du DEG ;

- conditions de mise en œuvre ;
- conditions d'exploitation.
- à la mise en œuvre :
  - stockage et manutention des géosynthétiques ;
  - circulation des engins.
- à l'exploitation de l'ouvrage :
  - hauteur d'eau ;
  - exposition aux UV ;
  - exposition au vent ;
  - températures, présence de glace ;
  - vagues ;
  - durée de vie ;
  - vandalisme ;
  - animaux ;
  - curage (moyens mis en œuvre, circulation d'engins,...) ;
  - sécurité des personnes et des biens.

### 3 Conséquences des études géologiques et géotechniques sur la conception du DEG

Pour un bon fonctionnement et un bon comportement du DEG, l'implantation, la géométrie et les conditions de réalisation de la retenue doivent être adaptées aux conditions géologiques et géotechniques du site et prendre en compte les caractéristiques de ce type d'étanchéité. Les principaux facteurs géologiques et géotechniques influençant la conception du DEG sont les suivants :

- la position de la nappe phréatique par rapport au fond de la retenue est un élément essentiel (risques de sous-pressions) ;
- la présence éventuelle de matières organiques susceptibles d'être à l'origine de dégagements gazeux doit être détectée ;
- les risques de présence de cavités et d'effondrements karstiques ou de sols susceptibles d'être dissous par l'eau sont à évaluer pour la conception du dispositif d'étanchéité et sa performance attendue ;
- les risques de tassements différentiels sous l'ouvrage sont à déterminer de façon à concevoir des dispositifs permettant de les éviter afin de ne pas mettre la géomembrane en tension ;



- la granulométrie attendue du fond de forme à la fin des terrassements va déterminer la conception de la structure support vis-à-vis de la protection de la géomembrane. Dans le cas où ce fond de forme est obtenu par broyage en place de matériaux rocheux, un essai de convenance de broyage doit être réalisé sur le site pour vérifier la conformité aux spécifications de la granulométrie obtenue avec le matériel envisagé. L'étude géotechnique doit permettre de conclure sur la nécessité ou non de mettre en œuvre une couche de forme, suivant l'agressivité du fond de forme, et sur les conditions de compactage du fond de forme.

## 4 Caractéristiques géométriques des retenues étanchées par DEG

Pour les talus intérieurs étanchés par une géomembrane (de remblais comme de déblais), il est conseillé de limiter les pentes de talus à des valeurs de 1/2,25 à 1/3 afin :

- d'assurer la stabilité au glissement de la structure support du DEG ;
- de permettre d'assurer plus facilement la stabilité au glissement de la structure de recouvrement éventuelle ;
- de faciliter la mise en œuvre de la géomembrane et par conséquent d'améliorer la qualité de sa pose et la qualité des soudures.

Des pentes plus raides nécessitent des études particulières.

Une largeur en crête du remblai de 5 m est conseillée (4 m minimum) afin de disposer de suffisamment de place pour installer la tranchée d'ancrage de la géomembrane et des géosynthétiques associés et de circuler avec les engins de chantier et d'entretien sans endommager la géomembrane.

Les pentes du fond doivent être suffisantes (2 % minimum) pour faciliter le nettoyage du bassin et surtout permettre, si nécessaire, un drainage efficace sous la géomembrane (eau et air) en évitant les contre-pentes. Afin d'améliorer le contact entre la géomembrane et son support et faciliter l'évacuation des gaz éventuels, les angles entre le fond de forme et les pieds des talus, les angles de raccordement des talus entre eux et les angles entre les talus et la crête doivent être arrondis (rayon de courbure de l'ordre de 0,50 m).

Il est souhaitable de privilégier, autant que possible, des formes de bassins simples, afin de limiter les découpes de la géomembrane et le nombre d'assemblages délicats à souder, surtout dans le cas des petites retenues.

## 5 Conception de la structure support

La structure support peut comporter plusieurs couches destinées à assurer les fonctions suivantes :

- fonction 1 : la résistance mécanique superficielle sous la géomembrane en fond et en talus ;
- fonction 2 : l'anti-poinçonnement de la géomembrane lors de la mise en œuvre et en service ;
- fonction 3 : les drainages de l'eau et des gaz (voir le paragraphe « [5. 2 Conception des dispositifs drainants sous la géomembrane](#) », page 39) ;
- fonction 4 : la filtration pour protéger les dispositifs drainants contre le colmatage et la structure support des migrations des fines.

La conception de ces différentes couches de la structure support est globale dans la mesure où une même couche peut assurer plusieurs fonctions et qu'à l'inverse, une même fonction peut être assurée par plusieurs couches. En outre, les différentes fonctions à assurer sont en interaction les unes avec les autres.

La structure support doit être suffisamment portante (fonction 1) pour permettre la circulation des engins de manutention des rouleaux et nappes de géosynthétiques et de ceux nécessaires à la mise en place de la structure de recouvrement éventuelle ; la couche support doit être stable sur les talus, y compris sous l'action des vagues en l'absence de structure de recouvrement.

La structure support doit être conçue de manière à assurer de façon durable la fonction anti-poinçonnement de la géomembrane (fonction 2). Le retour d'expérience montre que la structure support peut se dégrader, notamment sur les talus, sous l'effet des arrivées d'eau naturelles qui peuvent entraîner des érosions internes des structures supports pouvant conduire à rendre saillants des granulats agressifs ([Figure 22](#)). Ainsi, une structure support bien réalisée au départ peut se dégrader rapidement dans le temps, conduisant au poinçonnement de la géomembrane ; par conséquent, la

structure support doit être conçue de manière à assurer la fonction de drainage de l'eau (fonction 3) et la fonction de filtration (fonction 4), afin de permettre la pérennité de la fonction anti-poinçonnante ; pour éviter cela, il convient en particulier que les arrivées d'eau naturelles soient drainées efficacement et que les couches drainantes granulaires placées sur la pente soient auto-filtrantes vis-à-vis des risques d'érosion interne (règles granulométriques à respecter).

La structure support est conçue en tenant compte de la partie de l'ouvrage que l'on traite (remblai, cuvette et déblai), des caractéristiques du sol en place (en particulier la granulométrie) et des circulations d'eau dans le sol. Elle est donc à étudier et à adapter spécifiquement pour chaque site.



Figure 22 - Exemple de support trop agressif

## 5.1 Conception de la couche de forme

Dans la majorité des cas des barrages d'altitude, le fond de forme doit être complété par une structure support comportant une couche de forme granulaire. En effet, lorsque le fond de forme est trop agressif ou trop irrégulier, un géotextile, même très épais, ne saurait répondre aux sollicitations de poinçonnement très élevées, et une couche de forme granulaire, en sables ou graves présentant un  $D_{max}$  de 20 mm (éventuellement stabilisée au ciment ou au bitume en particulier sur talus si la pente est raide) doit être mise en place. Dans les cas peu courants en montagne où les matériaux du remblai présentent une granulométrie fine, on peut éviter la mise en œuvre d'une couche de forme granulaire.

Les études menées en 2014 dans le cadre du projet RISBA confirment la recommandation d'une couche de forme granulaire en sables ou graves présentant d'un Dmax de 20 mm. En effet, nous avons testé au laboratoire des matériaux de granulométrie 0-31,5 mm souvent adoptés par les maîtres d'œuvre pour la couche de forme (voir « [PARTIE 3 - DURABILITE DES DEG : PERFORMANCE DES DISPOSITIFS D'ETANCHEITE PAR GEOMEMBRANE VIS-A-VIS DES SOLLICITATIONS DE POINÇONNEMENT](#) », page 59) ; les résultats montrent que ces matériaux peuvent d'avérer trop agressifs, même en présence d'un géotextile de protection de masse surfacique importante ( $> 1000 \text{ g/m}^2$ ).

Les travaux conduits dans le projet RISBA permettent de formuler les conclusions suivantes :

- l'application d'une couche de forme d'une granulométrie 0-31,5 mm n'est pas adaptée et conduit à de forts risques d'endommagement de la géomembrane quel que soit le géotextile de protection choisi ;
- il est recommandé la mise en place d'une couche de forme granulaire en sables ou graves présentant un Dmax de 20 mm ;
- la couche de forme granulaire doit être associée à un géotextile de masse surfacique suffisante ( $1000 \text{ g/m}^2$  minimum) pour permettre une bonne protection de la géomembrane contre le poinçonnement (voir partie « [5.3 Conception des géotextile anti-poinçonnants](#) », page 44).

## 5.2 Conception des dispositifs drainants sous la géomembrane

Un géocomposite de drainage ou une couche drainante de granulats est à prévoir dans la majorité des cas des retenues d'altitude. Dans les cas rares où le remblai est perméable (barrages en enrochements constitués de roches non évolutives et non fragmentables), la fonction drainage du DEG n'est pas nécessaire sous la géomembrane, sur le talus amont du remblai.

## **RAPPEL DES OBJECTIFS DU DRAINAGE**

Le drainage sous la géomembrane est une des fonctions que doit assurer la structure support. Le drainage sous la géomembrane répond à plusieurs objectifs qui concourent à éviter les désordres sous la géomembrane :

- recueillir les fuites au travers et sous la géomembrane ;
- éviter les sous pressions hydrauliques, en particulier lors des abaissements rapides du plan d'eau, ou dues à des venues d'eau en provenance du terrain ;
- dissiper les sous pressions dues aux gaz ;
- protéger la structure support des mécanismes d'érosion qui conduisent à la dégradation de la fonction anti-poinçonnement de la couche support ;
- ausculter le barrage et connaître la performance du dispositif d'étanchéité.

## **DRAINAGE DE L'EAU - DIFFÉRENTES ZONES À DRAINER**

Le drainage des retenues d'altitude comprend :

- a. le drainage des venues d'eau naturelles (talus en déblai, fond de la cuvette, fondation du remblai) ;
- b. le drainage sous la géomembrane en cuvette ;
- c. le drainage sous la géomembrane sur les talus en déblai, en fonction des matériaux en présence ;
- d. le drainage sous la géomembrane sur le remblai, en distinguant le cas courant du remblai semi-perméable et celui plus rare du remblai perméable ;
- e. le drainage propre du remblai.

Les drainages (b), (c) et (d) sont inclus dans le DEG. Ils sont indépendants autant que possible du drainage des venues d'eau naturelles (a) et du drainage propre du remblai (e), afin de pouvoir différencier les débits drainés provenant des différentes zones.

## **CONCEPTION DES DISPOSITIFS DE DRAINAGE DE L'EAU ET DE FILTRATION**

Principes de la conception. La conception des dispositifs de drainage de l'eau (drainage du DEG) s'appuie sur les résultats de l'étude géotechnique ; elle tient compte de la perméabilité du substratum et des sols en remblai et en déblai et de leur homogénéité, ainsi que de la position de la nappe phréatique. Pour éviter le colmatage du dispositif drainant ou pour assurer la protection contre l'érosion de la structure



support, une couche filtrante, respectant les conditions de filtre, doit être associée au dispositif drainant.

Les dispositifs de drainage et de filtration peuvent être constitués par des matériaux granulaires et/ou géosynthétiques. On traite dans la présente section des dispositifs géosynthétiques.

L'usage de géotextiles et produits apparentés permet de remplacer les drains et filtres granulaires par des matériaux géosynthétiques d'épaisseurs moindres, faciles à transporter et rapides à mettre en place. Les géocomposites, constitués de plusieurs matériaux dont au moins un d'entre eux est un produit géosynthétique, peuvent assurer plusieurs fonctions ; ainsi, on peut avoir des géocomposites drainants qui comportent une âme drainante et une ou deux faces constituées par des géotextiles filtrants. Ces géocomposites sont plus faciles à mettre en œuvre que des produits indépendants.

Les géosynthétiques assurant les fonctions de drainage et de filtration sont dimensionnés en se référant à la norme NF G 38061 ; un fascicule de recommandations sur ce sujet a été rédigé par le CFG [8]. Les caractéristiques à spécifier pour les géosynthétiques assurant la fonction drainage font l'objet des normes NF EN 13252 et NF EN 13252/A1 « Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans les systèmes de drainage ». Les normes NF EN 13254 et NF EN 13254/A1 « Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction de réservoirs et de barrages » se rapportent aux autres fonctions, hors drainage, assurées par les géotextiles dans les barrages.

Le concepteur doit spécifier les caractéristiques des produits géosynthétiques qui répondent aux besoins de l'ouvrage, en particulier concernant :

- la capacité de débit dans le plan : elle doit être suffisante, en tenant compte de la compressibilité du produit sous la contrainte normale qui lui est appliquée dans l'ouvrage ; certaines expérimentations montrent que la capacité de débit dans le plan sous charge peut également être réduite selon les caractéristiques de déformation de la couche support et les efforts de cisaillement subis par le géosynthétique drainant ; la capacité de débit doit permettre d'évacuer le débit de fuite envisageable selon les situations de projet et d'éviter le soulèvement de la géomembrane ;

- la dimension de l'ouverture de filtration : elle permet le respect des lois de filtres de manière à éviter le colmatage des drains géosynthétiques ou l'érosion de la structure support ;
- le coefficient de frottement des géosynthétiques : il doit être suffisant au niveau des différentes interfaces pour ne pas induire d'instabilité du DEG et de traction dans la géomembrane.

Drainage de l'eau en cuvette. En cuvette, la pente du fond doit être supérieure à 2 %. Le dispositif drainant est le plus souvent complété par des tranchées drainantes qui jouent le rôle de collecteurs. Le dispositif de drainage est indispensable dans la plupart des ouvrages ; on pourrait envisager de s'en passer quand la perméabilité des sols sous-jacents est supérieure à  $10^{-4}$  m/s, mais même dans ce cas, il reste le plus souvent nécessaire car il est rare que la perméabilité soit homogène et que l'absence de zones moins perméables puisse être garantie.

Drainage de l'eau sur les talus. Pour les talus, on distingue le cas des sols perméables ( $k > 10^{-4}$  m/s) de celui des sols semi-perméables :

- dans le cas courant des remblais semi-perméables, un dispositif de drainage est nécessaire ;
- dans le cas rare des remblais perméables (barrages en enrochements par exemple), il est quasiment impossible de récupérer les éventuels débits de fuite ; en général, la couche granulaire sous la géomembrane est moins perméable que le corps du remblai. Toutefois les véritables barrages en enrochements perméables sont rares en montagne, les matériaux rocheux mis en œuvre étant évolutifs et fragmentables et conduisant à des caractéristiques de drainage fortement diminuées.

Les dispositifs de drainage et de filtration doivent permettre d'éviter l'érosion des couches granulaires de la structure support et l'apparition de granulats agressifs.

Lorsque le talus intérieur présente une risberme, il convient de veiller tout particulièrement à la continuité de la couche drainante au niveau de cette risberme, notamment pour les géosynthétiques drainants ; une solution peut consister à prévoir une évacuation vers le talus aval au niveau de la risberme.

Le dispositif de drainage du DEG doit aboutir à sa base à un collecteur drainant ; ce collecteur est séparé en plusieurs tronçons afin de pouvoir identifier la zone de la géomembrane à l'origine d'éventuelles fuites. Les eaux recueillies par les différents tronçons du collecteur sont ensuite évacuées vers l'aval par autant de tuyaux aveugles afin de pouvoir mesurer séparément les venues d'eau des différentes zones de la géomembrane. Les tuyaux et matériaux d'enrobage des tuyaux servant de drains et collecteurs, notamment dans le cas d'une partition des zones du dispositif de drainage, doivent être conformes aux prescriptions du fascicule 70 du CCTG « Ouvrages d'assainissement »

#### **RÔLE DU DISPOSITIF DRAINANT VIS-À-VIS DE L'AUSCULTATION DE L'OUVRAGE**

Le dispositif drainant joue un rôle fondamental pour l'auscultation de l'ouvrage et en particulier pour l'auscultation des remblais.

Il faut néanmoins souligner quelques limites : en cuvette et dans le cas d'un sous-sol perméable, l'absence de débit drainé ne garantit pas nécessairement l'absence de fuites à travers la géomembrane du fait d'infiltrations possibles ; en déblai, le débit drainé peut être augmenté par des arrivées d'eau naturelles. Dans ces cas, seule une double étanchéité permet de garantir la connaissance précise du débit de fuite.

#### **DRAINAGE DES GAZ**

Le drainage des gaz est nécessaire en cas de risques de remontée de nappe phréatique, de présence de matériaux organiques ou de formation de vapeur d'eau liée à l'humidité sous la géomembrane, etc. Les drains de gaz doivent être équipés de sorties placées aux points hauts et munies d'évents protégés des entrées d'animaux et de la pénétration d'eau. La [Figure 23](#) montre un cas de mauvais drainage des gaz sous la géomembrane.



Figure 23 - Drainage des gaz inefficace ayant entraîné la formation de bulles

### 5.3 Conception des géotextiles anti-poinçonnants

Le géotextile anti-poinçonnant, généralement l'élément supérieur de la structure support en contact avec la géomembrane, est nécessaire dans la majorité des cas ; il doit être dimensionné en fonction de l'agressivité des matériaux sous-jacents, des granulats de la couche de forme granulaire, du type de géomembrane (nature, rigidité, caractéristique mécanique, etc.) et de l'importance des sollicitations de mise en œuvre (conditions de circulation des engins et de dépôt des matériaux) et en service (hauteur d'eau, circulation éventuelle pour entretien, etc.).

Des géotextiles non tissés aiguilletés sont généralement utilisés car ils répondent aux sollicitations liées aux supports rencontrés pour les retenues d'altitude : contraintes de compression concentrées sur les aspérités et déformations sur les vides du support. Ils doivent être déformables (déformation à l'effort maximum en traction de l'ordre de 50 %) et suffisamment épais : dans les conditions testées en « [PARTIE 3 - DURABILITE DES DEG : PERFORMANCE DES DISPOSITIFS D'ETANCHEITE PAR GEOMEMBRANE VIS-A-VIS DES SOLLICITATIONS DE POINÇONNEMENT](#) », page 59, seuls les géotextiles de masse surfacique supérieure à 1000 g/m<sup>2</sup> ont permis d'assurer la fonction de protection de la géomembrane de façon suffisante.

Il a également été remarqué que pour deux géotextiles de masse surfacique comparable, des fibres polypropylène vierges apportent une meilleure efficacité pour la fonction de protection que des fibres recyclées.

Les caractéristiques à spécifier pour les géotextiles (notamment résistance à la traction, déformation à la rupture, résistance au poinçonnement, durabilité etc.) sont données par les normes NF EN 13254 et NF EN 13254/A1 « Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction de réservoirs et de barrages ».

Les travaux conduits dans le projet RISBA permettent de formuler les conclusions suivantes :

- les géotextiles de protection d'une masse surfacique au moins égale à 1000 g/m<sup>2</sup> sont recommandés ;
- la nature des fibres est importante : il est préférable d'utiliser des géotextiles non-tissés aiguilletés en fibres vierges plutôt qu'en fibres recyclées.

## 6 Détermination de la structure d'étanchéité

### 6.1 Les géomembranes : définitions, familles et structures

Les géomembranes sont définies dans la norme NFP 84-500. La caractérisation de la perméabilité des géomembranes est donnée dans cette norme sous la forme d'un flux d'eau maximum : 0,1 litre/(jour x mètre carré) mesuré sous une pression de 100 kPa (10 mètres d'eau). L'ordre de grandeur des flux réels mesurés sur les géomembranes, en partie courante, est en général 100 fois plus faible, ce qui est satisfaisant pour l'usage considéré. Ces valeurs de flux en partie courante ne doivent pas être confondues avec le niveau d'étanchéité global du DEG qui intègre les pertes au droit des joints et des raccordements aux ouvrages.

Les géomembranes utilisées sont des géomembranes manufacturées sous forme de lés de 1,5 à 10 mètres de large<sup>1</sup>. Elles sont livrées sous forme de rouleaux ou de nappes (pré-assemblage de lés en usine) ; dans ce dernier cas, les lés sont pré-assemblés en atelier afin de limiter la longueur des joints à réaliser dans les conditions toujours plus délicates du chantier.

Les familles de géomembranes les plus courantes utilisées en France dans le cas des ouvrages hydrauliques sont les suivantes :

- géomembranes en matériau de synthèse :
  - PVC-P (polychlorure de vinyle plastifié) ;
  - PEHD (polyéthylène haute densité) ;
  - PP-F (polypropylène flexible) ;
  - EPDM (élastomère éthylène propylène diène monomère).
- géomembranes bitumineuses :
  - à base de BITUME oxydé ;
  - à base de BITUME polymère.

Ces cinq familles chimiques de géomembranes ont des propriétés et des comportements différents. Ces propriétés spécifiques orientent le choix de la géomembrane, en fonction des caractéristiques du site. On trouve une présentation des géomembranes dans de nombreux documents, parmi lesquels on peut citer les publications de Lambert [9] et de Rollin et al. [10], ainsi que les guides SETRA [6] et CFG [11] et [12].

Les géomembranes présentent différents grands types de structures : les géomembranes monoplis ou multiplis, les géomembranes armées ou renforcées et les géomembranes composées (géocomposites). Ces structures sont destinées à apporter des propriétés particulières à la géomembrane de base. Par exemple, le renforcement d'une géomembrane améliore ses caractéristiques mécaniques et sa stabilité dimensionnelle, mais, en contrepartie, sa déformabilité est moindre. De même, un géotextile associé en usine à une géomembrane peut lui apporter, en fonction de ses

---

<sup>1</sup> Les membranes fabriquées en place (pulvérisation ou coulis d'un produit liquide sur un géotextile) sont très peu utilisées et déconseillées car il est en particulier difficile d'obtenir des matériaux de qualité homogène pour un coût acceptable.



caractéristiques une meilleure résistance au poinçonnement et un coefficient de frottement plus élevé.

## 6.2 Caractéristiques générales des différentes géomembranes courantes

Les paramètres importants à prendre en compte pour le choix de la famille de géomembrane dans un projet de retenue d'altitude sont en particulier sa facilité de pose (petits ouvrages), sa résistance aux UV (en l'absence de structure de recouvrement), sa déformabilité (adaptation au support) et son comportement à basse température.

Les géomembranes en PEHD sont les moins adaptées pour les retenues d'altitude. En effet, même si elles présentent les avantages d'une grande inertie vis à vis des produits chimiques et d'une bonne résistance aux UV, leurs principaux inconvénients sont : (i) une mise en place plus délicate, en raison de leur plus grande variation dimensionnelle en fonction de la température (pouvant entraîner des problèmes de soudure et de raccordement aux ouvrages) ; (ii) leur moindre souplesse qui les rend moins résistantes au poinçonnement dans le cas d'une hauteur d'eau élevée et d'un support agressif. Cette tendance, pour les géomembranes en PEHD, a été montrée lors des enquêtes de retour d'expérience. A contrario, les géomembranes en bitume polymère, en PVC-P, en PP-F et en EPDM présentent l'avantage d'une plus grande déformabilité et d'une plus faible dilatation thermique.

Concernant la durabilité, le critère prépondérant, en l'absence de structure de recouvrement, est la résistance aux UV : dans ce cas, celle-ci doit être examinée avec le plus grand soin lors du choix de la nature de la géomembrane et de son traitement spécifique. La résistance au UV est bonne pour le PEHD, l'EPDM, le Bitume polymère et le PP-F (ce dernier produit est d'utilisation plus récente en France - une quinzaine d'années cependant - et sa résistance à plus long terme au vieillissement climatique reste à confirmer) ; plus particulièrement pour le PVC-P, sa résistance aux UV est fonction de sa formulation chimique et il convient de retenir des matériaux de qualité présentant des garanties suffisantes sur ce point.

Après le choix de la famille, l'épaisseur est le deuxième élément à déterminer. Bien qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune méthode ou moyen de dimensionnement unanimement reconnu permettant, d'une part de comparer les différents types de

géomembrane, d'autre part de fixer une épaisseur pour un ouvrage donné vis-à-vis des caractéristiques mécaniques et de la durabilité physique et chimique, il n'en demeure pas moins que l'épaisseur est un élément essentiel qui conditionne, pour une famille donnée, les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et de durabilité d'une géomembrane. Notamment, la résistance aux UV, à l'oxydation et à la perte de plastifiants augmente avec l'épaisseur. Aussi, il convient de bien examiner au niveau d'un projet l'incidence financière du choix d'une épaisseur supérieure aux pratiques usuelles, sachant que la géomembrane n'est qu'un élément du coût global et que cette augmentation d'épaisseur apporte une amélioration importante des caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et de durabilité.

Le guide SETRA [6] spécifie des épaisseurs pour chacune des familles de géomembranes les plus répandues sur le marché français. Les épaisseurs données dans le guide SETRA ont été fixées pour des ouvrages de profondeurs généralement plus faibles (de l'ordre de 3 mètres au maximum) que les retenues traitées ici et pour des géomembranes généralement couvertes ; pour les retenues d'altitude, des épaisseurs plus importantes sont généralement nécessaires afin de prendre en compte la contrainte hydraulique plus élevée, la nature de la structure support et l'absence éventuelle de couverture. Les épaisseurs ci-après peuvent être proposées dans la plupart des cas comme des valeurs minimales pour les géomembranes courantes considérées dans cette section :

- PVC-P : 1,5 mm ;
- PP-F : 1,5 mm ;
- EPDM : 1,5 mm ;
- Bitume polymère : 4 mm.

Les résultats du projet RISBA ne conduisent pas à modifier ces propositions.

### 6.3 Caractéristiques à spécifier pour la géomembrane

L'épaisseur n'est qu'une des caractéristiques à spécifier par le maître d'œuvre. L'ensemble des caractéristiques à spécifier est donné par la norme NF EN 13361 « Caractéristiques requises pour l'utilisation des géomembranes dans la construction des réservoirs et des barrages ». Elles concernent les propriétés physiques, hydrauliques, mécaniques (notamment résistance à la traction, déformation à la rupture, résistance au poinçonnement), thermiques (comportement à basse température,

dilatation thermique) et de durabilité. Toutefois, on attire l'attention sur le fait que cette norme définit les caractéristiques à spécifier mais ne fournit pas de valeurs seuils. On trouve également les caractéristiques à spécifier dans le guide SETRA [6].

C'est le rôle du maître d'œuvre de fixer les valeurs seuils, y compris l'épaisseur, pour les différentes caractéristiques à spécifier. Ces valeurs seuils dépendent de la famille et du type de structure de la géomembrane (géomembranes courantes, géomembranes armées, géomembranes composées) et des sollicitations subies par la géomembrane (conditions de mise en œuvre, hauteur d'eau, constitution de l'ensemble du DEG, etc.).

#### **Analyse de matériaux de site**

Dans le cadre du projet RISBA, il avait été envisagé des prélèvements de géomembranes sur plusieurs sites. Au cours de l'enquête de terrain, il a été observé une certaine réticence de la part des gestionnaires d'ouvrages à venir prélever de la géomembrane saine même si une réparation était envisagée. De plus, cette opération de prélèvement n'est pratiquement possible que si la géomembrane est non recouverte. En définitive, grâce à la collaboration Franco-Italienne et en profitant d'une opération de restauration de l'ensemble du DEG de la retenue de Grantesta en Vallée d'Aoste, un échantillon de géomembrane a pu être prélevé. Des analyses physiques (masse surfacique et épaisseur) et mécanique (résistance à la traction) ont été réalisées en laboratoire. Pour juger de la durabilité du produit après plusieurs années de service, la comparaison de ces grandeurs mesurées avec celles du produit lors de son installation sur site est nécessaire. Malgré les efforts menés, il n'a pas été possible d'obtenir ces informations ce qui ne permet pas de conclure de manière objective sur la durabilité de cette géomembrane après plusieurs années de service.

## **6.4 Cas d'utilisation d'une double géomembrane**

Lorsque les sols sous-jacents présentent des risques d'érosion interne ou de dissolution, il peut être nécessaire de recourir à une double étanchéité avec une structure d'étanchéité composée de deux géomembranes séparées par une couche

drainante. Une attention particulière doit alors être apportée vis-à-vis des conditions de drainage éventuellement nécessaires sous l'étanchéité secondaire. Enfin, la stabilité doit être assurée entre chacune des interfaces entourant l'étanchéité secondaire du DEG sur pente ; elle peut être obtenue par l'utilisation de géocomposites (par exemple, une géomembrane associée en usine à un géotextile) ou d'une géomembrane structurée (présentant une rugosité d'origine) permettant d'améliorer la résistance au frottement des interfaces, associées à des géocomposites drainants. Dans tous les cas, des essais représentatifs avec les matériaux réellement prévus d'être utilisés sont nécessaires pour valider la solution proposée.

## 6.5 Méthodes de détection et de localisation de fuites dans les géomembranes

Pour les ouvrages importants ou présentant des risques particuliers, la mise en place sous la géomembrane d'une méthode électrique incluant un dispositif permanent est à prévoir dès la conception, en vue d'un suivi régulier de l'étanchéité de la retenue. On trouve toute information sur ce type de méthodes de suivi de la géomembrane dans le document CFG [13]. Par ailleurs, de nouvelles technologies à base de fibres optiques sont développées pour détecter et localiser tant les fuites que les mouvements.

# 7 Structure de recouvrement

## 7.1 Structures de recouvrement utilisées actuellement sur talus

Les enquêtes ont montré des dégradations de la géomembrane liées à la glace sur la plupart des retenues d'altitude, avec des importances plus ou moins grandes. Ce n'est que pour les retenues de basse et moyenne altitude et dans le cas de structures supports sableuses de bonne qualité que ces dégradations sont apparues de moindre importance. Mais il faut prendre en considération que le retour d'expérience ne porte que sur quelques années d'exploitation et qu'on ne peut pas exclure que, sur la durée de vie de l'ouvrage, des hivers plus froids puissent entraîner la formation d'épaisseurs de glace importantes, même en moyenne altitude, et donc des dégradations plus importantes que celles constatées.

Il a été observé que les protections partielles en enrochements, limitées à la partie haute, présentaient souvent l'inconvénient de retenir des blocs de glace qui se détachaient à retenue basse, conduisant lors de leur chute à l'endommagement de la géomembrane sur les talus et le fond de la cuvette. Les retenues d'altitude peuvent être vidées plusieurs fois par hiver et connaissent des vitesses d'abaissement du niveau de l'eau rapide, ce qui accentue les risques de dégradation par la glace des géomembranes exposées.

## 7.2 Géomembrane recouverte ou exposée ?

Comme pour la plupart des ouvrages étanchés par géomembrane, la question de recouvrir ou non la géomembrane se pose pour les retenues d'altitude.

Compte tenu des effets de la glace, la mise en place d'une structure de recouvrement complète est en général recommandée, pour les raisons suivantes :

- protection contre la glace ;
- absence de risques de déchirures importantes de la géomembrane, et donc diminution des risques d'infiltrations importantes dans le remblai et limitation des sollicitations hydrauliques vis-à-vis de la stabilité du remblai ;
- protection contre le vandalisme ;
- sécurité des personnes (possibilité de remonter sur la protection en enrochements) ;
- stabilité au vent de la géomembrane ;
- résistance au battillage du support ;
- protection contre les UV ;
- protection contre les corps flottants.

La structure de recouvrement doit être étudiée et mise en œuvre avec le plus grand soin. On doit notamment prendre en compte :

- son coût élevé ;
- sa mise en œuvre délicate qui ne doit pas endommager la géomembrane, nécessitant une surveillance permanente par le maître d'œuvre pendant cette phase de chantier ;
- la durée plus importante du chantier ;
- l'impossibilité de surveiller visuellement la géomembrane ;
- la nécessité d'étudier la stabilité du DEG, en considérant l'action du poids de cette structure, de la glace et des engins éventuels de mise en œuvre et la présence

d'interfaces peu frottantes entre géosynthétiques au sein du DEG, en particulier au contact des géomembranes lisses.

Le choix de laisser la géomembrane exposée est réservé aux sites les moins exposés par rapport aux effets de la glace (faible altitude d'implantation et site protégé des vents dominants) et en toute hypothèse pour des ouvrages de petites tailles (classes géométriques C sans enjeux importants et D). Ce choix s'appuie alors sur les avantages de cette solution :

- coût moins élevé ;
- chantier plus court ;
- examen visuel de la géomembrane possible ;
- réparations plus aisées.

Les inconvénients de cette solution sont :

- une durabilité moindre ;
- une sensibilité aux agents extérieurs (UV, glace, vagues, vents, vandalisme, etc.) ;
- la nécessité de prévoir un ancrage de la géomembrane à sa périphérie et un lestage à sa surface pour éviter les risques de soulèvement par le vent ; si la surface de géomembrane est importante, le coût de ces ancrages peut être élevé.

En conclusion, une structure de recouvrement complet de la géomembrane s'impose pour :

- les grands ouvrages (retenues de classe géométrique A, B et C avec forts enjeux), et ce pour des raisons de sécurité ;
- les petites retenues exposées à des effets de gel importants (site en haute altitude, supérieure à 1 800 m), ou soumis à des vents importants, et ce pour des raisons de durabilité de la géomembrane.

Il est important de noter que le retour d'expérience recueilli lors du projet RISBA permet de confirmer ces précédentes recommandations.

Pour les autres cas, l'aspect économique intégrant la durabilité de la géomembrane et son entretien doit être pris en compte dans le choix de mettre en place ou non une structure de recouvrement complet.



### 7.3 Exemples de structures de recouvrement sur talus

Sur les talus (remblai et déblai), les structures de recouvrement peuvent par exemple être constituées des matériaux suivants :

- une couche d'enrochements - ou rip-rap - reposant sur une couche intermédiaire en sable et graviers placée sur un géotextile antipoinçonnant. Cette solution constitue la technique la plus classique. Les principes de conception sont les suivants (section « [7.6 Protection du talus intérieur - Dimensionnement du rip-rap](#) », page 55) : (i) les enrochements sont dimensionnés pour résister à l'action des vagues et de la glace ; (ii) la stabilité de la structure de recouvrement doit être vérifiée et des géosynthétiques de renforcement peuvent être nécessaires pour reporter une partie des efforts de glissement en tête de talus ; (iii) la perméabilité de la structure de recouvrement doit être suffisante pour éviter le développement de pressions hydrauliques à sa base, à l'interface avec la géomembrane. La mise en œuvre de ce type de protection nécessite une étude détaillée et le plus souvent une mise au point par planches d'essais avec les matériaux et matériels réellement prévus d'être utilisés sur le chantier. Les techniques de positionnement par GPS sur les équipements de mise en œuvre (en particulier sur les pelles à bras long fréquemment utilisées pour ce travail) permettent la réalisation d'un travail soigné et rapide pour la mise en place de la couche de matériaux granulaires au contact avec le géotextile protégeant la géomembrane. Ces techniques sont recommandées pour les grandes retenues ;
- matelas de gabions ou matelas Reno, reposant sur un géotextile antipoinçonnant. Pour les pentes raides, les matelas doivent être ancrés en tête de talus pour assurer leur stabilité ;
- dalles en béton coulées en place. Celles-ci permettent de protéger des pentes plus raides. Elles nécessitent une couche support plane afin d'éviter des concentrations de contraintes de poinçonnement sur la géomembrane et elles doivent être placées sur un géotextile de protection. Il est nécessaire de prévoir des dispositifs de drainage des dalles afin d'éviter la formation de sous-pressions (géotextile de transmissivité suffisante) ;
- pavés en béton : ils peuvent être autobloquants, avec une butée en pied de talus ou ancrés en tête de talus par l'intermédiaire de câbles métalliques ou d'un géosynthétique de renforcement sur lequel ils sont fixés ; dans ce dernier cas, il faut vérifier l'efficacité et la durabilité de cette fixation. Les pavés autobloquants nécessitent une très bonne planéité du support.

## 7.4 Stabilité au glissement de la structure de recouvrement sur talus

La stabilité de la structure de recouvrement vis-à-vis du glissement, sous l'action de son poids propre, de la glace et de la neige, ainsi que des actions hydrauliques et des actions éventuelles des engins, doit être assurée et vérifiée. Ces efforts peuvent être repris, en partie ou en totalité, par le frottement aux différentes interfaces ; s'ils ne sont pas repris en totalité par frottement, une partie des efforts devra être reprise par une butée en pied de talus et/ou par un transfert en tête de talus par des géosynthétiques de renforcement. La stabilité peut être améliorée, pour une pente donnée de la géomembrane, par la mise en place d'une structure de recouvrement d'épaisseur variable, augmentée au pied du talus et diminuée en tête. La mise en œuvre et le contrôle sur chantier de cette dernière disposition peuvent être facilités par le recours à des systèmes de positionnement par GPS, notamment pour des grandes retenues.

La mise en place d'une risberme sur le talus entraîne de nombreuses difficultés : continuité du drainage sous la géomembrane, soudures de la géomembrane difficiles au niveau des angles, transfert des efforts en tête de talus par des géosynthétiques de renforcement ou mise en place d'ancrages intermédiaires ; ces difficultés font que cette solution n'est pas recommandée et que si elle est adoptée, elle doit faire l'objet d'une étude spécifique détaillée préalable avec des planches d'essais.

L'interface la plus défavorable, correspondant au coefficient de frottement le plus faible, se situe généralement au contact de la géomembrane : il faut veiller à ce que cette interface peu frottante soit placée au dessus de la géomembrane et non sous la géomembrane, afin d'éviter que celle-ci soit mise en traction. La circulation des engins de mise en œuvre sur la pente sera évitée ; lorsque ceci n'est pas possible (cas des rampants supérieurs à 20 m), le poids des engins est pris en compte et on vérifie sur le chantier que les effets dynamiques sont réduits au minimum (pas de manœuvres brutales). Des dispositions comme l'utilisation de pelles à bras long équipées de chenilles type « marais » ainsi que la mise en place d'une procédure stricte n'autorisant la circulation de l'engin que sur une épaisseur minimale adaptée à son poids et avec un déplacement selon la ligne de plus grande pente seulement, sans mouvement de reptation des chenilles, permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants avec des pentes de 1/3.

La norme AFNOR XP G38-067 « Géosynthétiques-Géotextiles et produits apparentés / Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente / Justification du dimensionnement et éléments de conception » fixe les méthodes de calcul des efforts à reprendre en tête de talus et des dimensions de la tranchée d'ancrage correspondantes. Cette justification repose essentiellement sur la connaissance des valeurs des coefficients de frottement des différentes interfaces du DEG, valeurs qui ont des conséquences sur le choix de la pente du talus et la nécessité éventuelle de géosynthétiques de renforcement. Elles sont donc de nature à entraîner des choix de conception importants de la part du maître d'œuvre qui doit, dès le stade des études de projet, préconiser des valeurs minimales pour les coefficients de frottement.

## 7.5 Structure de recouvrement en cuvette

La structure de recouvrement est réduite en fond de retenue où les pentes sont faibles et les différentes sollicitations moindres. Dans le cas où la géomembrane n'est pas recouverte sur les talus, il peut être intéressant de protéger le fond de la cuvette sur une bande périphérique d'une largeur minimale de 4 à 5 mètres située au pied du talus. Une telle protection granulaire d'une épaisseur de l'ordre de 0,50 mètre permet d'éviter les chocs directs des blocs de glace sur la géomembrane dans cette zone sensible et de participer au lestage de la géomembrane vis-à-vis des effets du vent.

## 7.6 Protection du talus intérieur - Dimensionnement du rip-rap

Lorsque la géomembrane est recouverte par des enrochements ou rip-rap, ceux-ci doivent être conçus pour résister aux vagues dues au vent et pour résister à la glace.

### PROTECTION DU TALUS INTÉRIEUR CONTRE L'EFFET DES VAGUES

Le dimensionnement pour résister aux vagues est décrit en détail dans le bulletin CIGB N°91 « Barrages en remblai, protection du talus amont » [14] et dans [15] et on se réfère à ces recommandations pour la conception du rip-rap.

Le [Tableau 4](#), repris de [16], résume l'épaisseur  $e$  de la couche d'enrochements et le diamètre médian  $D_{50}$ . La dimension des plus gros blocs est limitée à  $e$ . Par ailleurs, les éléments les plus petits n'ont pas un diamètre inférieur à 0,10 m.

| Hauteur de projet<br>des vagues ( $H_d$ ) [m] | Épaisseur (e)<br>du rip-rap [m] | $D_{50}$ des<br>blocs [m] |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 0,30                                          | 0,30                            | 0,20                      |
| 0,55                                          | 0,40                            | 0,25                      |
| 0,80                                          | 0,50                            | 0,30                      |
| 1,05                                          | 0,60                            | 0,40                      |
| 1,30                                          | 0,70                            | 0,45                      |
| 1,55                                          | 0,80                            | 0,50                      |

Tableau 4 - Dimension du rip-rap en fonction pour résister aux vagues dues au vent

Le rip-rap repose sur une couche d'assise en sable et graviers placée sur un géotextile antipoinçonnant, de manière à assurer la protection de la géomembrane contre le poinçonnement. La couche support ne doit pas présenter un  $D_{max}$  supérieur à 20 mm. Son épaisseur est de 0,20 à 0,30 m.

#### PROTECTION DU TALUS INTÉRIEUR CONTRE L'EFFET DE LA GLACE

La stabilité et l'intégrité de la couche de recouvrement du DEG sur le talus intérieur soumis à l'action des glaces peuvent être mise à mal par les phénomènes suivants, qui sont décrits en détail dans le bulletin CIGB N° 105 « Barrages et ouvrages annexes dans les climats froids » [16] :

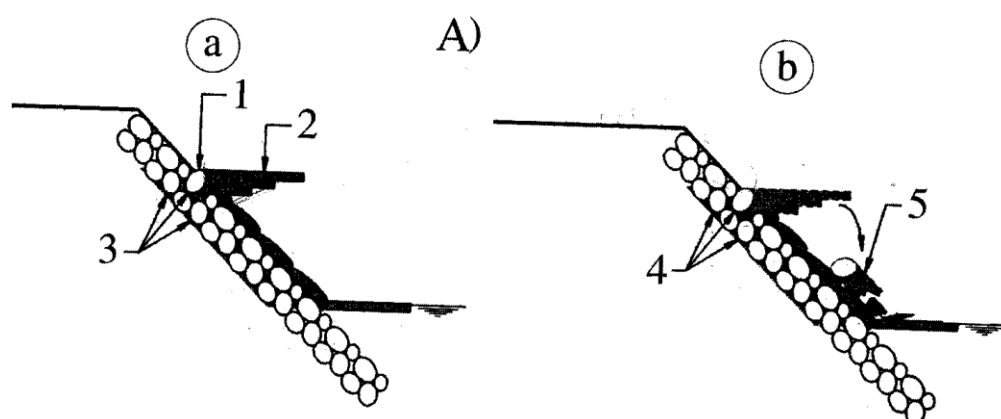
- action du gel et du dégel : outre la pérennité de la roche constituant les enrochements, le gel de l'eau s'écoulant des matériaux sous-jacents saturés peut conduire à des soulèvements du rip-rap lors de la baisse du plan d'eau ;
- action des glaces lors de la baisse du niveau d'eau : des massifs de glace en porte-à-faux se forment sur les talus. Ces massifs peuvent glisser ou basculer en arrachant les matériaux du rip-rap (Figure 24) ; selon l'expérience acquise au Québec, ces mouvements sont mineurs sur les pentes inférieures à 1 pour 3 ;
- action des glaces lors de la montée du niveau d'eau : la perte de blocs d'enrochements causée par ce phénomène est rare et généralement limitée à de petits blocs ;
- poussées horizontales des glaces causées par la couverture de glace soumise à l'expansion thermique, aux vents et courants, et par l'impact des glaçons poussés par les courants et les vents. Le marnage du plan d'eau provoque des fissures et une rupture de continuité dans la couverture de glace ayant pour effet de réduire considérablement les poussées d'origine thermique.

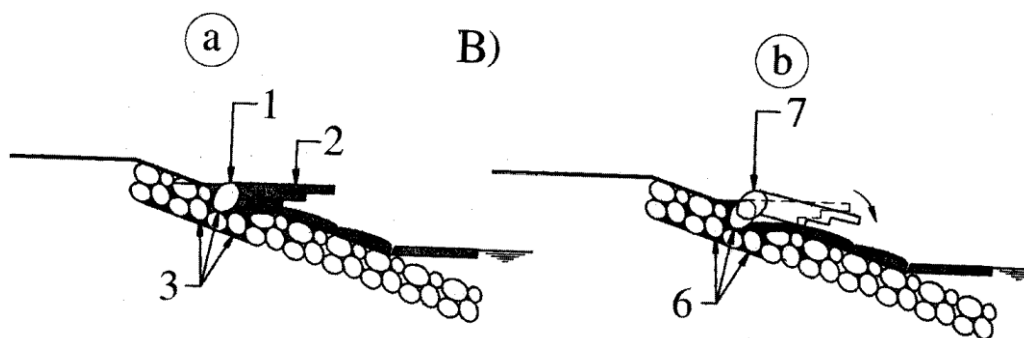
Cette analyse fait apparaître que le principal mode d'agression de la couche d'enrochements de protection des talus du réservoir par la glace est engendré par le marnage du plan d'eau.

Contrairement au dimensionnement vis-à-vis de l'action des vagues, la CIGB fait état d'une absence de méthodologie établie pour le dimensionnement d'un rip-rap vis-à-vis de l'action des glaces. De ce fait, il est généralement considéré que le rip-rap conçu pour résister à l'énergie des vagues est suffisant pour résister aux forces des glaces ; cependant, cette pratique voit ses limites dans le cas des petites retenues d'altitude, où la longueur réduite du fetch conduit à une faible hauteur de houle alors que les épaisseurs de glace peuvent être importantes (supérieures à 0,5 m).

La CIGB relève que l'analyse des dégâts causés par l'action des glaces fait ressortir une corrélation entre le D50 du rip-rap et l'épaisseur de la couverture de glace. Si le D50 est inférieur à l'épaisseur couche de glace, le rip-rap peut être endommagé par la glace. D'autres références techniques peuvent éventuellement compléter cette règle, notamment [17] et [18]. Pour donner un ordre de grandeur, les épaisseurs de glace rapportées lors de l'enquête de terrain étaient comprises entre 20 et 60 cm maximum.

Il ressort de la littérature que les désordres potentiels restent très limités dans le cas de pentes de talus inférieures à 1 pour 3, les blocs reprenant leur position sans basculer vers l'aval lors du dégel ([Figure 24](#) - Schémas B). On peut donc considérer que si des désordres se produisaient, ces derniers ne mettraient pas le DEG à nu et seraient uniquement préjudiciables en termes d'exploitation.





- 1 Blocs d'enrochements en saillie
- 2 Couverture de glace gelée sur le rip-rap
- 3 Blocs gelés dans une couche épaisse de glace
- 4 Dégel partiel et rupture de la glace
- 5 Blocs tombés par suite de la rupture de la glace
- 6 Moment exercé sur les blocs, créant une rotation
- 7 Couverture de glace brisée sur les berges, avec détachement des blocs en saillie

Figure 24 - Schéma de l'action de la glace sur un rip-rap (adaptée du bulletin CIGB n°105) :

A) pente raide ; B) pente douce ; a. en hiver ; b. au printemps

## PARTIE 3 - DURABILITÉ DES DEG : PERFORMANCE DES DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE VIS-À-VIS DES SOLLICITATIONS DE POINÇONNEMENT

---

### 1 Contexte

Il a été observé lors de l'enquête de terrain (voir « [PARTIE 1 - RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES REMBLAIS ET LEUR DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE](#) », page 16) que le poinçonnement, qui correspond à un phénomène physique par lequel un corps en pénètre un autre en le déformant, pouvait conduire à la perforation de la géomembrane et donc à la rupture localisée de l'étanchéité. Dans le cas des barrages considérés dans le projet RISBA, des sollicitations de poinçonnement de la géomembrane peuvent être sous-jacentes (issues de la couche de forme granulaire) ou bien sus-jacentes (issues de la structure de protection). Bien que l'analyse de cette problématique soit essentielle dans la conception des DEG, il n'existe actuellement ni de méthode analytique ni de méthode empirique permettant de dimensionner une structure de protection de la géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement. Le guide « Retenues d'altitude » indique que les géotextiles de protection « doivent être suffisamment épais (masse surfacique de 500 à 1000 g/m<sup>2</sup> en général) » ([1], p.142), mais cette recommandation ne permet pas de dimensionner un produit pour la fonction protection.

Il existe actuellement un essai, selon la norme XP P 84-523 [19], qui permet de déterminer la pression hydrostatique nécessaire au percement d'un DEG posé sur un support poinçonnant de type granulat. Cet essai à court terme donne une pression hydrostatique de rupture. Cependant, les géosynthétiques sont des matériaux à base de polymère synthétique et présentent généralement un comportement fonction du temps quand ils sont soumis à des efforts mécaniques (comportement de type fluage). Ainsi, le phénomène de poinçonnement peut, au cours du temps, mettre en péril la durabilité de la géomembrane qui assure à elle seule l'étanchéité de la retenue. De plus, une fois le domaine élastique dépassé, les géosynthétiques peuvent présenter un domaine d'écoulement plastique significatif, c'est-à-dire que, sous effort constant, des déformations significatives peuvent être observées avant que la rupture ne soit atteinte. En définitive, l'essai selon la norme XP P 84-523 ne détermine qu'une pression finale de rupture de la géomembrane et ne permet pas de justifier de manière exhaustive la



qualité d'un géotextile de protection. En effet, la géomembrane peut avoir perdu son élasticité et ainsi être endommagée de façon inacceptable bien avant la rupture. En des termes plus pratiques, pour justifier l'efficacité d'un géotextile de protection, il faut s'assurer que, même si les conditions de services (pression hydrostatique due à la hauteur d'eau) ne conduisent pas la rupture à court terme, elles n'induisent pas non plus à long terme des déformations irréversibles qui pourraient être préjudiciables pour la durabilité de la géomembrane.

Dans cette partie de l'action 2.4a du projet, un dispositif expérimental a été développé pour simuler le comportement des produits géosynthétiques et naturels dans des conditions de service. En se basant sur ce dispositif, il a également été développé un protocole pour justifier le géotextile de protection comme suffisant ou non (pour la fonction protection de la géomembrane). Enfin, le dispositif et protocole expérimental a été utilisé pour comparer différents produits géotextiles avec une géomembrane et un support granulaire. De ce programme expérimental, il ressort plusieurs conclusions pratiques utiles pour la conception des retenues collinaires ou d'altitudes.

Dans la présente étude, il n'est pas investigué les phénomènes physico-chimiques (température, pH, etc.) qui peuvent également altérer les propriétés physiques et mécaniques de la géomembrane et ainsi affecter sa durabilité.

## 2 Protocole expérimental pour la justification de la performance d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement

Ce protocole a été mis au point pour justifier la performance d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement [20]. Il s'agit de proposer une démarche expérimentale permettant de s'assurer que la géomembrane d'un DEG ne risque pas d'être endommagée par poinçonnement, compte tenu de la couche de forme granulaire et de la couche support par géotextile prévues pour le DEG.

Ce protocole n'est pas adapté pour la justification d'un géotextile de protection sus-jacent à la géomembrane dans le cas de la présence d'une structure de recouvrement.

Ce protocole expérimental a été élaboré pour reproduire au mieux les conditions in-situ. Il requiert ainsi l'emploi des différents matériaux du site (ou des équivalents sous réserve que l'équivalence soit démontrée) et la connaissance de la hauteur d'eau maximale de la retenue. Ce protocole prend en compte le comportement différé dans le temps (fluage) des produits géosynthétiques. Cependant, il ne fait pas intervenir des variations thermiques ou physico-chimiques (par exemple le pH, la concentration en oxygène, etc.) bien que ces dernières peuvent modifier le comportement des géosynthétiques.

Le principe est de soumettre dans une cellule une pression hydraulique constante sur un DEG comportant notamment une géomembrane surmontant un géotextile de protection reposant sur une couche de forme granulaire potentiellement poinçonnante (exemples présentés aux [Figure 25](#), [Figure 26](#) et [Figure 27](#)). La pression est appliquée pendant une durée préalablement fixée. Au terme de cette dernière, le DEG est retiré de la cellule et les matériaux sont analysés visuellement et mécaniquement selon les descriptions présentées ci-après. La cellule utilisée dans cette étude est composée de deux éléments distincts pouvant être solidarisés. Chaque élément de la cellule comporte une cavité dont le diamètre utile est égal à 300 mm ([Figure 28](#)). L'étanchéité est assurée au niveau des surfaces de serrage du DEG. Pour prendre en considération la variabilité expérimentale, il est recommandé de répéter cinq fois cette procédure avec des éprouvettes vierges de géomembrane et géotextile et un état de surface du granulat différent.

Lors du démontage de la cellule, les produits géosynthétiques sont retirés puis analysés visuellement. Chaque éprouvette de géomembrane est minutieusement analysée pour détecter la présence de percement. Si un percement est observé, le géotextile de protection est automatiquement considéré comme insuffisant. Des photos de chaque matériau testé sont prises (exemples présentés aux [Figure 29](#) et [Figure 30](#)).



Figure 25 - Exemple de couche granulaire sous-jacente aux produits géosynthétiques du DEG



Figure 26 - Exemple de géotextile de protection (anti-poinçonnant) mis en place au-dessus d'une couche granulaire (voir Figure 25)



Figure 27 - Exemple de géomembrane mise en place au-dessus d'un géotextile de protection et d'une couche granulaire (voir Figure 25 et Figure 26)

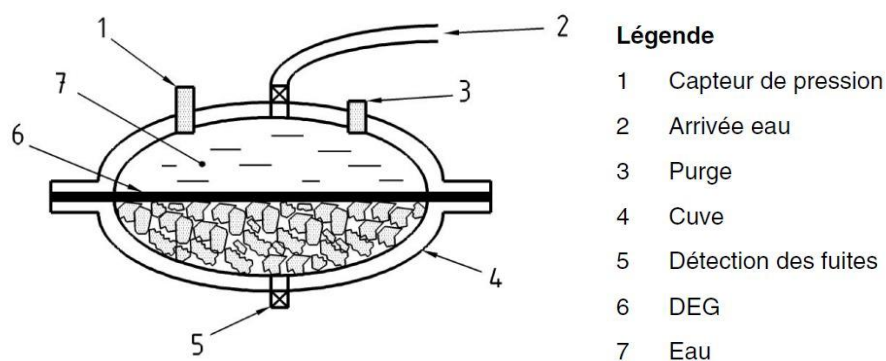


Figure 28 - Schéma de la cellule sous pression hydrostatique permettant de simuler les sollicitations de poinçonnement d'un support granulaire sous une géomembrane chargée par une pression hydrostatique sus-jacente - schéma tiré de la norme XP P 84-523 [3]



Figure 29 - Exemple d'un géotextile de protection (vue de la face en contact avec les granulats) qui a subi des sollicitations de poinçonnement

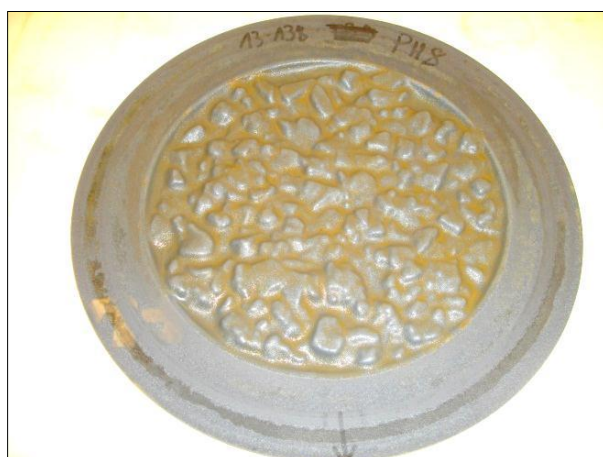


Figure 30 - Exemple d'une géomembrane (vue de la face en contact avec l'eau) qui a subi des sollicitations de poinçonnement

Une géomembrane qui a subi des sollicitations de poinçonnement peut voir ses propriétés de résistance interne altérées. Si c'est le cas, il peut être conclu qu'elle a été endommagée par les sollicitations de poinçonnement ce qui n'est pas acceptable. Immédiatement après l'enlèvement de l'éprouvette de géomembrane de la cellule sous pression hydrostatique, la résistance de la géomembrane est déterminée selon l'essai d'éclatement (Figure 31) de la norme NF EN 14151 [21]. Selon cette norme, cinq éprouvettes doivent être soumises à essai. Ainsi, les cinq éprouvettes sollicitées dans la cellule sous pression hydrostatique subiront cet essai d'éclatement.

Ce dernier détermine la contrainte maximale  $\sigma_{max}$  et la déformation  $\epsilon_{max}$  à la rupture. Ces valeurs sont alors comparées à celles obtenues à partir de la même géomembrane vierge correspondant donc aux caractéristiques intrinsèques du produit. Pour tenir compte de l'hétérogénéité des produits, la comparaison se fait en considérant la valeur  $\sigma_{max}$  ou  $\epsilon_{max}$  du produit vierge auquel l'écart-type multiplié par un coefficient 1,4 a été retranché. Si la valeur  $\sigma_{max}$  ou  $\epsilon_{max}$  de la géomembrane sollicitée est inférieure strictement à celle décrite précédemment, le géotextile de protection est jugée insuffisant pour assurer la fonction protection. Dans le cas contraire, le géotextile est considéré comme suffisant et l'efficacité de la protection peut être appréciée qualitativement comme « acceptable » ou « correct » en se basant sur les analyses visuelles décrites ci-dessus.



Figure 31 - Exemple d'une éprouvette de géomembrane à la fin d'un essai d'éclatement selon la norme NF EN 14151

### 3 Conclusion sur le protocole expérimental

Le protocole expérimental décrit ci-dessus permet, en utilisant les matériaux réels, de justifier la résistance au poinçonnement de la géomembrane d'un DEG, compte tenu de la couche de forme granulaire et de la couche support par géotextile envisagées pour la structure support. Ce protocole se déroule en trois phases distinctes : la première est destinée à reproduire expérimentalement les sollicitations de poinçonnement qui ont lieu dans des conditions de service. La seconde correspond à une analyse visuelle des produits sollicités. La dernière phase permet de juger quantitativement la fonction protection du géotextile en comparant les déformations maximales avant rupture de la géomembrane qui a été sollicitée avec celle de la même géomembrane mais qui n'a pas été sollicitée (propriétés intrinsèques). Les déformations maximales avant rupture sont mesurées par l'essai d'éclatement de la norme NF EN 14151 [21].

### 4 Application du protocole d'essai à une campagne expérimentale

L'objectif de cette campagne expérimentale, en plus de démontrer la pertinence du protocole expérimental présenté ci-dessus, est d'établir des recommandations pratiques pour la conception des DEG en rapport avec la problématique du poinçonnement.

Il a été choisi de représenter un DEG constitué classiquement, comme observé sur les barrages traités dans le projet RISBA, de haut en bas par :

- une géomembrane ;
- un géotextile de protection ;
- une couche de forme en matériau granulaire.

Une seule géomembrane a été considérée dans cette étude. Il s'agit d'une géomembrane de nature PVC-P d'épaisseur 2 mm. Ce type de géomembrane est classiquement rencontré dans les retenues d'altitude comme l'a montré l'enquête de retour d'expérience présentée en « [PARTIE 1 - RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES REMBLAIS ET LEUR DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOMEMBRANE](#) », page 16, de



cette action 2.4a. L'essai d'éclatement selon la norme NF EN 14151 appliqué à cette géomembrane a permis de déterminer la contrainte et la déformation maximale, caractéristiques intrinsèques du produit (Tableau 5).

Plusieurs géotextiles non-tissés aiguilletés (Tableau 6) ont été sélectionnés dans cette étude pour assurer la fonction protection de la géomembrane décrite ci-dessus. Bien qu'ils soient tous de nature non-tissés aiguilletés, ils diffèrent par la nature des fibres polypropylène, vierges ou recyclées, et par leur masse surfacique, allant de 800 à 1000 g/m<sup>2</sup>. Le géotextile A est illustré aux Figures 26 et 29 et un exemple d'un échantillon de géotextile en fibres polypropylène vierges est donné à la Figure 32.



Figure 32 - Illustration d'un géotextile non-tissé aiguilleté en fibres polypropylène vierges pour la fonction protection

| Géomembrane                        | Déformation maximale à la rupture $\epsilon_{\max}$ (%) | Écart-type (%) |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------|
| Vierge (moyenne sur 5 éprouvettes) | 68,6                                                    | 2,5            |
| A (1 éprouvette)                   | 55,2                                                    | n/a            |
| B (1 éprouvette)                   | 62,8                                                    | n/a            |
| C (1 éprouvette)                   | 72,5                                                    | n/a            |
| D (1 éprouvette)                   | 71,4                                                    | n/a            |

Tableau 5 - Valeurs des déformations maximales obtenues pour les géomembranes sollicitées par poinçonnement et protégées par les géotextiles A, B, C et D (voir Tableau 6)

Le matériau granulaire de la couche de forme présente une étendue granulométrique comprise entre 0 et 31,5 mm (Figure 33). Cette dernière a été choisie car elle a été rencontrée dans plusieurs ouvrages visités dans le cadre de ce projet de recherche, bien que le guide « Retenues d'altitude » préconise une étendue granulométrique pour la couche de forme comprise entre 0 et 20 mm ([1], p. 142). Une photographie de l'état



de surface du granulat mis en place dans la cellule de pression hydrostatique est représentée à la [Figure 26](#). Lors du compactage de ce matériau granulaire dans la cellule, il a été observé une migration des fines vers le bas, ce qui permet de conclure que, bien qu'un granulat 0-31,5 mm a été utilisé, la granulométrie de l'état de surface obtenu se rapproche d'un granulat 5-31,5 mm du fait de la ségrégation des fines.

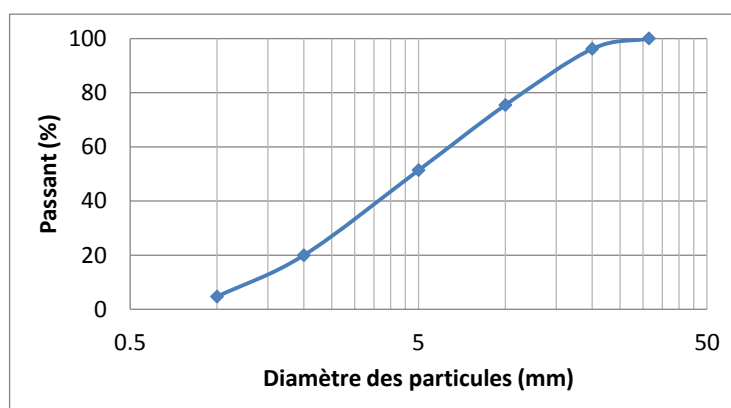


Figure 33 - Courbe granulométrique du granulat considéré

Le protocole expérimental décrit ci-dessus a été appliqué aux quatre DEG constitués par la géomembrane en PVC-P, par les géotextiles A, B, C et D et par la couche de forme ayant un état de surface d'étendue granulométrique proche de 5-31,5 mm. Une pression hydrostatique égale à 1,75 bar a été appliquée durant quatre jours et la température de l'essai a été maintenue constante à 20°C. Le choix de la pression hydrostatique a été fait pour être représentatif des ouvrages investigués.

Les déformations maximales  $\epsilon_{\max}$  des géomembranes protégées respectivement par les géotextiles A, B, C et D sont présentées dans le [Tableau 5](#). Quel que soit le géotextile de protection, il n'a pas été observé de modification de la contrainte maximale d'éclatement  $\sigma_{\max}$  par rapport à celle du produit vierge. Des résultats obtenus de cette campagne expérimentale, il ressort que le géotextile A en fibres recyclés s'est avéré nettement insuffisant pour assurer la fonction protection de la géomembrane ([Figure 34](#)) à la différence des géotextiles en fibres vierges, même si le géotextile B a une masse surfacique inférieure. Cependant, bien qu'il ait été observé que le géotextile B assurait une meilleure protection que le géotextile A ([Tableau 5](#)), il reste insuffisant pour éviter tout endommagement physique de la géomembrane testée. Pour les géomembranes protégées par les géotextiles C et D, il est observé dans le [Tableau 5](#) que la déformation maximale à la rupture n'a subi aucune baisse. Ainsi, dans

les conditions testées, seuls les géotextiles C et D composés de fibres polypropylène vierges et dont la masse surfacique est supérieure à 1000 g/m<sup>2</sup> ont permis d'assurer la fonction protection de façon suffisante. Cependant, même si l'essai d'éclatement a montré que la résistance mécanique de la géomembrane n'a pas été altérée, il a été observé visuellement des déformations sur cette dernière (exemple donné à la [Figure 35](#)).

| Géotextile | Nature des fibres | Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )* |
|------------|-------------------|---------------------------------------|
| A          | recyclées         | 777                                   |
| B          | vierges           | 736                                   |
| C          | vierges           | 869                                   |
| D          | vierges           | 1076                                  |

Tableau 6 - Géotextiles non-tissés aiguilletés utilisés dans le cadre de cette étude

\*mesurée selon la norme NF EN ISO 9864 [22]

Ainsi, il est ici clairement mis en évidence que la masse surfacique seule d'un géotextile de protection ne peut pas servir comme seul paramètre dimensionnant. De plus, il est également montré la nature des fibres, recyclés ou vierges, peut avoir un impact significatif sur la qualité de la protection d'un géotextile.



Figure 34 - Déformations observées sur la géomembrane protégée par le géotextile A vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.



Figure 35 - Déformations observées sur la géomembrane protégée par le géotextile C vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.

En conclusion, le programme expérimental mené a montré que le protocole proposé pour justifier la résistance au poinçonnement de la géomembrane d'un DEG, avec une couche support et un géotextile donnés, permet de discriminer les différentes structures supports (incluant la couche de forme granulaire et de la couche support par géotextile) en écartant celles insuffisantes pour assurer la fonction protection. Actuellement, en l'absence de méthode analytique permettant de dimensionner les structures supports à partir de ses caractéristiques propres, le protocole expérimental développé dans le cadre de ce programme de recherche reste le seul moyen pour justifier la performance de la fonction protection obtenue pour la géomembrane. Cependant, ce programme ne pouvait pas être exhaustif du fait la diversité des produits géosynthétiques, géomembranes et géotextiles de protection et de la nature des matériaux granulaires utilisés en couche de forme de la structure support.

### 1 Conclusions

L'action 2.4a avait pour objectif de mieux définir la durabilité des dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG) des retenues collinaires et d'altitude.

L'enquête de retour d'expérience a mis en évidence les conceptions classiques de DEG et celles plus spécifiques. Cette enquête a également permis d'observer in-situ différents types d'endommagements de la géomembrane et finalement montrer que les problématiques de poinçonnement et de perforation de la structure d'étanchéité figurent parmi les plus récurrentes.

Au cours de l'enquête de retour d'expérience et dans le cadre d'une collaboration franco-italienne, une éprouvette de géomembrane a été prélevée sur la retenue de Grantesta en Vallée d'Aoste et des analyses physiques et mécaniques ont été menées au plateau de recherche technologique géosynthétiques d'Irstea Antony. Cependant, en l'absence d'éprouvette de géomembrane de référence, ces analyses n'ont pas permis de conclure sur la durabilité de ce produit. Il est ainsi mis en évidence que, lorsque des analyses de durabilité n'ont pas été prévues dès la conception d'un projet, il est très difficile d'y revenir après plusieurs années de service de l'ouvrage car les points de référence ne sont plus accessibles.

L'action 2.4a s'est ensuite concentrée sur la caractérisation expérimentale en laboratoire destinée à mieux prendre en compte de durabilité du DEG dès la conception de l'ouvrage. Cette investigation qui s'est focalisée sur les sollicitations de poinçonnement de la géomembrane a été motivée par plusieurs points : (i) ce type de sollicitations peut conduire à la rupture de l'étanchéité qui est la fonction première du DEG ; (ii) ce sont les causes de dommages les plus fréquentes qui ont été observées sur le terrain lors de l'enquête de retour d'expérience, (iii) les recommandations actuelles ne sont pas suffisamment détaillées sur cette problématique et il n'existe actuellement et ni de méthode analytique ni de méthode empirique permettant de dimensionner une structure de protection de la géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.

Ainsi, il a été proposé une démarche expérimentale complète permettant de justifier la résistance au poinçonnement de la géomembrane d'un DEG, compte tenu de la couche de forme granulaire et de la couche support par géotextile envisagées pour la structure support. Un programme expérimental a été appliqué selon cette démarche ce qui a permis d'aboutir à plusieurs recommandations opérationnelles pour l'ingénierie :

- (i) la masse surfacique d'un géotextile ne permet pas à elle seule de dimensionner un produit ;
- (ii) pour deux géotextiles de masse surfacique égale, des fibres polypropylène vierges apportent une meilleure efficacité pour la fonction protection que des fibres recyclées ;
- (iii) dans les conditions testées, seuls les géotextiles composés de fibres polypropylène vierges et dont la masse surfacique est supérieure à 1000 g/m<sup>2</sup> ont permis d'assurer la fonction protection de façon suffisante ce qui est relativement conforme avec les produits utilisés dans les ouvrages récents enquêtés dans l'action 2.1.
- (iv) concernant le support en matériaux granulaires, une couche de forme granulaire présentant une granulométrie 0-31,5 mm a été mis en œuvre pour le programme expérimental. Il a mis en évidence un caractère particulièrement agressif pour la géomembrane et ce type de couche support 0-31,5 mm n'est pas à recommander. Il est recommandé la mise en place d'une couche de forme granulaire en sables ou graves présentant d'un Dmax de 20 mm pour réduire les risques de perforation de la géomembrane par poinçonnement.

## 2 Perspectives

L'action 2.4a a permis de mettre en évidence des perspectives d'évolution du sujet traité à plus ou moins long terme ; celles-ci sont détaillées ci-dessous :

- à court terme, il s'agit d'affiner (i) le seuil de retranchement de 1,4 en testant d'autres types de supports, et (ii) les analyses visuelles en utilisant des outils permettant de scanner et de modéliser la surface déformée ;
- à moyen terme, des études complémentaires sont à mener sur les frottements aux interfaces (évolution de l'essai au plan incliné), mais aussi sur les géocomposites de drainage (contrainte tangentielle, obstruction du filtre, etc.).

- enfin, à long terme, il serait intéressant de prendre en compte (i) l'effet des marnages, et (ii) le fait que la couverture de protection devient un critère dimensionnant pour la stabilité sur pente.

## RÉFÉRENCES

---

- [1] PEYRAS L., MERIAUX P. Retenues d'altitude.  
Guide de recommandations, ed. Quae, 2009, 352 p.
- [2] BARD A., BETH T., PEYRAS L. & GIRARD H. Retour d'expérience sur la conception, la réalisation et le suivi des ouvrages - Éléments de diagnostic du parc d'ouvrages.  
Document de travail interne, septembre 2007.
- [3] CAZZUFFI D. Comportement de la géomembrane appliquée en 1959 sur le barrage de Contrada Sabetta.  
Rueil-Malmaison, Comité français des géosynthétiques, 299-3.4, Rencontres géosynthétiques 99, Bordeaux, France, 12-13 octobre 1999
- [4] ROYET P. La durabilité des géomembranes dans les barrages en remblai.  
Actes du colloque CFG-CFGB. Saint-Etienne, France, 18-19 juin 2002, 97-117
- [5] CIGB. Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages – Principe de conception et retour d'expérience.  
Paris, Commissions internationale des grands barrages, bulletin 135, 2010.
- [6] SETRA. Étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier.  
Bagneux, Sétra/LCPC, Guide technique, 95 p., Guide complémentaire, 71 p., 2000.
- [7] CFG. Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques.  
Rueil-Malmaison, Comité français des géosynthétiques, 56 p., fascicule N°12, 1998.
- [8] CFG. Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration.  
Comité français des géosynthétiques, 54 p., 2014.
- [9] LAMBERT S. Les géomembranes  
Ingénieries EAT, 11 : 27-40. 1997.
- [10] ROLLIN A., PIERSON P., LAMBERT S. Géomembranes : guide de choix.  
Montréal, Canada, Hermès/Lavoisier, 298 p., 2002.
- [11] CFG. Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes.  
Rueil-Malmaison, Comité français des géosynthétiques, 47 p., fascicule N°10, 1991.



- [12] CFG. Recommandations générales pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets.  
Rueil-Malmaison, Comité français des géosynthétiques, 48 p., fascicule N°11, 1995.
- [13] CFG. Présentation de méthodes de détection de fuites dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes.  
Rueil-Malmaison, Comité français des géosynthétiques, 44 p., 2003.
- [14] CIGB. Barrages en remblai – Protection du talus amont  
Paris, Commission internationale des grands barrages, bulletin N°91, 1993.
- [15] CFGB, DEGOUTTE G., coord. Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi.  
Antony, Cemagref éditions, 2002, cédérom.
- [16] CIGB. Barrages et ouvrages annexes dans les climats froids.  
Paris, Commission internationale des grands barrages, bulletin N°105, 1995.
- [17] CETMEF. ROSA 2000 : recommandation pour le calcul aux états limites des ouvrages en site aquatique.  
Compiègne, Cetmef, cédérom, 2001.
- [18] USACE. Engineering and Design – Ice engineering – Engineer Manual Em 1110-2-1612 [en ligne].  
Washington, DC, États-Unis : US Army Corps of Engineers (USACE), 30 octobre 2002, format PDF. Disponible sur : <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1612/entire.pdf> (consulté le 21.04.2009)
- [19] AFNOR (2008) XP P84-523 Géomembranes - Dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) - Détermination de la résistance au poinçonnement sous charge hydrostatique.
- [20] PERRIN X. Eude des performances hydrauliques et mécaniques des dispositifs d'étanchéité par géomembranes dans les retenues d'altitude.  
Mémoire de stage ingénieur, 81 p., 2014
- [21] AFNOR (2010) NF EN 14151 Géosynthétiques – Détermination de la résistance à l'éclatement.
- [22] AFNOR (2005) NF EN ISO 9864 Géosynthétiques - Méthode d'essai pour la détermination de la masse surfacique des géotextiles et produits apparentés.