

# Dispositifs d'étanchéité par géomembrane des retenues d'altitude : retour d'expérience et recommandations

Hugues Girard <sup>a</sup>, Laurent Peyras <sup>b</sup>, Patrice Mériaux <sup>b</sup>, Gérard Degoutte <sup>b</sup>, Luc Deroo <sup>c</sup> et Marc Lefranc <sup>d</sup>

## Spécificités des retenues d'altitude

Le parc français de retenues d'altitude est riche d'environ cent cinq ouvrages construits essentiellement dans les Alpes ou les Pyrénées. Ce parc est jeune avec essentiellement des ouvrages de moins de dix ans, les premiers rares précurseurs ayant été édifiés vers 1990. Ce parc devrait encore connaître une forte expansion puisque environ trente projets sont connus ou en cours d'instruction administrative en 2008.

Les retenues d'altitude sont des ouvrages hydrauliques implantés en station de loisirs de montagne (photo 1) 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) et plus rarement l'irrigation. Les retenues d'altitude sont souvent des ouvrages à usages multiples.

Ces retenues, malgré des volumes souvent modestes, induisent des risques potentiellement importants sur les enjeux en aval et un aménagement sur deux intéresse la sécurité publique au sens où la rupture de la partie en remblai de l'ouvrage ou l'expulsion brutale du volume d'eau stockée aurait des conséquences graves pour les personnes et les biens situés en aval. Les raisons se trouvent dans leur position dominante au-dessus d'installations à forte fréquentation touristique ou de zones résidentielles de station de ski et dans les pentes fortes qui conduiraient

à la formation de phénomènes torrentiels en cas d'accident.

Leur implantation en montagne, entre 1 200 et 2 700 m, 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 autre problématique. Cette situation entraîne des difficultés spécifiques dans toutes les phases de la vie de l'ouvrage : 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 (avalanches, instabilités de versants, débordements torrentiels ou chutes de blocs), une fenêtre de construction très limitée dans l'année, des sollicitations importantes par la glace, des structures soumises au froid intense, une surveillance difficile en conditions hivernales, etc.

Les retenues d'altitude présentent également des spécificités techniques propres, dont les deux principales suivantes :

- compte tenu des conditions topographiques de la montagne, elles sont implantées sur des zones de replat et le plus souvent ne ferment pas un talweg. En conséquence, elles sont en général conçues en déblai-remblai, comme un bassin, avec un remblai les ceinturant partiellement ;
- compte tenu des conditions géotechniques, elles sont très souvent étanchées artificiellement par géomembrane sur l'ensemble de leur cuvette.

## Les contacts

a. Cemagref, UR REBX, Réseaux, épuration et qualité des eaux, 50 avenue de Verdun 33612 Cestas Cedex.

b. Cemagref, UR OHAX, Ouvrages hydrauliques, 3275 route Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5.

c. ISL Ingénierie, 75 boulevard Mac Donald, 75019 Paris.

d. Électricité de France, Centre d'ingénierie hydraulique (CIH), 15 avenue du Lac du Bourget, Savoie Technolac, 73373 Le Bourget du Lac Cedex.



▲ Photo 1 – Exemple de retenue d'altitude.

1. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire.
2. Délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires.
3. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt de Savoie.
4. Comité français des barrages et réservoirs.
5. Syndicat national des téléphériques de France.

Tous ces éléments conduisent à des spécificités de faisabilité, de choix de site, de conception et de réalisation, mais aussi à des problématiques propres d'exploitation et à des pathologies particulières, auxquelles les bureaux d'études et les exploitants n'ont pas nécessairement, à l'heure actuelle, de réponses techniques adéquates. Plus encore que pour les autres barrages, les solutions sont complexes.

Le retour d'expérience des retenues d'altitude en service et des projets en cours est en demi-teinte, montrant des pathologies et des incidents, voire des accidents, dus à des défauts de conception et de réalisation. La réhabilitation des ouvrages, dont la sécurité ou la fiabilité n'est pas satisfaisante, est également une préoccupation essentielle des maîtres d'ouvrages et de leurs bureaux d'études.

À partir du récent guide de recommandations « *Retenues d'altitude* » (Peyras et Mériaux, 2009), cet article fait la synthèse d'un retour d'expérience sur le comportement et la pathologie des dispositifs d'étanchéité par géomembrane en altitude et donne quelques recommandations fortes du guide relatives aux dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG), en particulier sur la structure support, le drainage inhérent au DEG et la structure de recouvrement. La focalisation sur ces trois points qui nous paraissent essentiels ne signifie pas, bien entendu, que les autres points abordés dans le guide ne sont pas importants pour le bon fonctionnement du DEG, tout particulièrement ce qui se rapporte à la géomembrane. Enfin, un descriptif général du guide, qui permet de situer la problématique DEG dans l'ensemble des aspects traités par le guide, termine l'article.

L'élaboration de ce guide a bénéficié du concours du MEEDDAT<sup>1</sup>, de la DIACT<sup>2</sup> et du conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, d'un suivi par la DDAF 73<sup>3</sup>, le CFBR<sup>4</sup> et le SNTF<sup>5</sup>. Un dizaine d'experts a participé à la relecture des parties consacrées aux géosynthétiques.

## Retour d'expérience des DEG des retenues d'altitude

### Ouvrages existants analysés

Cette analyse s'appuie sur une enquête de retour d'expérience conduite durant l'été 2007 dans les massifs alpins et pyrénéens qui a permis de visiter et de faire une analyse documentaire sur environ trente ouvrages. S'y ajoutent une vingtaine d'ouvrages enquêtés en 2004 et l'examen de près de vingt dossiers de projets dans le cadre du contrôle exercé par les services départementaux de l'État. Au total, ce sont environ soixante-dix retenues d'altitude qui ont été enquêtées.

### Description générale des aménagements

– Type de barrage : ouvrages en remblai-déblai, avec étanchéité complète par géomembrane du remblai et de la cuvette.

– Altitude d'implantation : 1 200 à 2 700 m.

– Volume de retenue : 5 000 à 400 000 m<sup>3</sup> (moyenne environ 40 000 m<sup>3</sup>).

– Hauteur maximale du remblai : 4 à 20 m.

– Fruit du talus amont : 1,5 à 3.

– Fruit du talus aval : 1,5 à 3,5.

– Évacuateur de crues : en général de type déversoir en enrochements bétonnés, placé sur le remblai, le plus souvent sans dissipateur d'énergie ou très rustique.

– Dispositif d'auscultation : souvent réduit à un point de collecte unique des débits de drainage.

– Organe de vidange : conduite traversant le remblai ou placée dans la fondation.

### Retour d'expérience sur les aspects géologie, géotechnique et conception

Le présent article est centré sur les parties « Étanchéité par géomembrane » du guide, et présente ici le retour d'expérience relatif à cette étanchéité.

Néanmoins, la conception et le bon fonctionnement du dispositif d'étanchéité par géomembrane reposant également sur les aspects « Géologie, géotechnique et conception », il est important de résumer succinctement le retour d'expérience sur ces aspects.

Les enquêtes réalisées montrent qu'une large majorité des remblais (90 %) repose sur une fondation résistante (moraine ou rocher) et non compressible. La coupe géologique type rencontrée lors des reconnaissances d'un sous-sol de montagne montre du haut vers le bas :

- en surface une couche dépassant rarement plus de 2 m de terre végétale, limons, tourbe, argile ou éboulis ;
- des moraines argilo-graveleuses à blocs, pouvant être affleurantes et suffisamment épaisses pour constituer le substratum géotechnique ;
- le substratum géologique rocheux (schistes, grès, granite, quartzites, cargneules, gneiss, calcaire, marno-calcaire...) pouvant être affleurant, avec parfois une frange importante altérée.

Cette coupe-type met en évidence la particularité géologique des sites de montagnes, qui se caractérisent par des difficultés d'étanchéité naturelle : présence d'éboulis sur pentes, moraines, rocher fracturé, karsts, absence d'argile en haute altitude, etc. Les analyses hydrogéologiques des fondations montrent très souvent (70 %) des venues d'eau.

Concernant la conception géotechnique des retenues d'altitude, les matériaux des remblais sont constitués majoritairement (60 %) de moraines et de schistes. À un moindre niveau, on rencontre des remblais en matériaux limoneux (15 %) et en enrochements (15 %). Les remblais en enrochements sont construits en déblai miné et parfois concassé issu principalement de quartzites, de gneiss et de calcaires. Le retour d'expérience montre que leur mise en remblai conduit à un matériau qui n'est plus un enrochement et dont les caractéristiques de drainage sont fortement diminuées. De fait, les cas de retenues d'altitude avec remblai drainant sont apparus marginaux.

Un remblai sur deux présente une pente de talus aval trop raide au regard des règles de l'art (pente supérieure à 1H/2V). Un constat analogue est fait sur les pentes des talus amont. Cela peut conduire à une sécurité au glissement insuffisante

au regard des standards actuels de justification. Concernant le drainage, les enquêtes ont montré que 20 % des barrages ne disposent pas de dispositif de drainage du remblai et sont donc vulnérables en cas de défaillance du dispositif d'étanchéité.

Concernant l'exécution géotechnique, le retour d'expérience des chantiers a mis en évidence de nombreuses situations problématiques. Dans l'ordre d'importance, on peut citer :

- des excès d'eau (terrains et matériaux très humides, difficultés de contrôle des venues d'eau en sous-sol, portance très faible) ;
- des difficultés de compactage (densité insuffisante, déformabilité importante) ;
- des difficultés liées à des reconnaissances insuffisantes (pénurie de matériaux, matériaux inadaptés pour le remblai, zones non portantes).

En conséquence, les sites d'implantation des retenues d'altitude, leur topographie et leur géologie imposent souvent une étanchéité généralisée de la cuvette, la principale raison étant le contrôle des fuites en fondation. 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.

D'autres raisons conduisent également 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 obligeraient à des filtres sophistiqués pour garantir leur stabilité à la vidange.

### Retour d'expérience sur les dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG)

Quatre principaux types de géomembrane de synthèse sont rencontrés sur les ouvrages étanchés artificiellement : EPDM<sup>6</sup>, PEHD<sup>7</sup>, PP-F<sup>8</sup> et PVC-P<sup>9</sup>. Il n'y a pas d'utilisation privilégiée d'une famille particulière parmi les géomembranes de synthèse ; sur les ouvrages enquêtés, il n'a pas été rencontré de géomembrane bitumineuse.

Les géomembranes sont non protégées ou protégées uniquement sur la partie supérieure dans la très grande majorité (90 %) des retenues d'altitude (photo 2), le recouvrement intégral étant très rarement observé.

La couche support de la géomembrane présente un niveau de qualité très variable d'un ouvrage à l'autre : si 10 % des couches supports sont sableuses et non agressives, on recense 40 % de couches irrégulières à très irrégulières pouvant être agressives et engendrant des sollicitations

de poinçonnement sur la géomembrane ; les écoulements souvent rencontrés dans la couche support accentuent son irrégularité lorsque cette couche n'est pas auto-stable (entraînement des fines pouvant rendre saillants des granulats grossiers agressifs).

L'endommagement de la géomembrane est une pathologie très courante sur les retenues d'altitude : 40 % des retenues connaissent régulièrement des endommagements importants (arrachements, très nombreux poinçonnements chaque année), 15 % connaissent des défauts récurrents nécessitant des interventions annuelles de maintenance.

Deux facteurs explicatifs de l'endommagement des géomembranes ont été mis en évidence lors des enquêtes : l'action de la glace et l'agressivité du support. Le retour d'expérience a montré que la présence d'une risberme avec couverture supérieure en petits enrochements est généralement un facteur aggravant d'endommagement de la géomembrane : la glace qui se forme au niveau de la risberme et de la couverture au-dessus de la risberme reste accrochée aux enrochements et des décrochements brutaux de blocs de glace, entraînant parfois des cailloux, se produisent ensuite, avec pour conséquences des perforations et des déchirures sur la géomembrane, en partie inférieure du parement non recouvert et en fond de retenue lorsque celle-ci est vide.

Les dommages sont fortement liés aux déplacements de la glace sur les parements (reptation suivant l'abaissement du plan d'eau ou chutes de blocs se décrochant à retenue vide) qui entraînent des percements de la géomembrane pouvant aller jusqu'à des phénomènes de déchirures décimétriques (photo 3).

Ces dommages sont fortement amplifiés en présence d'une couche support de qualité médiocre ou agressive.

Les photos 4 et 5 illustrent deux types d'endommagement observés sur la géomembrane ; dans le cas de la photo 4, les fuites importantes ont vidé la retenue.

Il est important de noter que ces dommages peuvent conduire à l'impossibilité d'utiliser la retenue, mais plus grave, entraîner des risques pour la stabilité du remblai (par saturation et risques d'érosion interne).

6. Éthylène propylène diène monomère.

7. Polyéthylène haute densité.

8. Polypropylène flexible.

9. Chlorure de polyvinyle souple.

▼ Photo 2 – Exemple de risberme et de recouvrement partiel de la géomembrane en partie haute du talus.



## Recommandations relatives aux dispositifs d'étanchéité par géomembranes

### Généralités

Le guide traite de façon détaillée du dispositif d'étanchéité par géomembrane dans différents chapitres : conception, mise en œuvre, contrôle d'exécution ainsi que traitement de la pathologie de l'endommagement de la géomembrane sur les ouvrages en service.

Les matériaux géosynthétiques utilisés pour les retenues d'altitude sont présentés de façon générale. Si les géotextiles et produits apparentés sont traités pour les fonctions importantes qu'ils assurent dans ces ouvrages (drainage, filtration, protection, renforcement), une large place est consacrée aux géomembranes qui assurent la fonction étanchéité.

Sans négliger les aspects généraux, le guide s'attache à détailler les spécificités propres aux retenues d'altitude et à leurs conséquences sur le DEG. Pour plus d'informations sur les aspects généraux, l'utilisateur du guide pourra se référer à différents documents :

– Guide SETRA/LCPC<sup>10</sup> (2000) : « *Étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier* » ;

– Guide CIGB<sup>11</sup> (à paraître) : « *Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages - Principes de conception et retour d'expérience* », présenté par Lefranc et al. (2009) ;

– Fascicule CFG<sup>12</sup> n° 10 (1991) : « *Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes* ».

Il est rappelé que pour les retenues d'altitude, comme dans tous les ouvrages, la géomembrane n'est pas utilisée seule : elle fait partie du dispositif d'étanchéité par géomembrane (AFNOR<sup>13</sup>, norme NFP 84-500) et c'est le DEG qui est dimensionné pour répondre aux objectifs d'étanchéité de l'ouvrage et non la géomembrane uniquement. Outre les matériaux constituant ses différentes structures (support, étanchéité et recouvrement éventuel), 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.

Nous n'aborderons ici que trois des éléments du DEG qui nous sont apparus primordiaux à



▲ Photo 3 – Exemple de reptation de la glace sur la géomembrane.



▲ Photo 4 – Chutes de blocs de glace ayant entraîné des déchirures décimétriques de la géomembrane en fond de retenue.



▲ Photo 5 – Nombreuses perforations de la géomembrane par effet de robotage par la glace.

10. Service d'études techniques des routes et autoroutes – Laboratoire central des Ponts et Chaussées.

11. Commission internationale des grands barrages.

12. Comité français des géosynthétiques.

13. Association française de normalisation.

l'analyse du retour d'expérience : le support, le drainage et la structure de couverture, sans oublier que l'ensemble des recommandations données par le guide doit bien entendu être pris en compte par le maître d'œuvre.

### Recommandations relatives à 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 la partie « Le drainage sous la géomembrane »),
- *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 couche support granulaire peut se dégrader, notamment sur les talus, sous l'effet des arrivées d'eau naturelles susceptibles d'entraîner des érosions des couches supports pouvant conduire à rendre saillants des granulats agressifs (photo 6). Ainsi, une couche support bien réalisée au départ peut se dégrader rapidement dans le temps, conduisant au poinçonnement de la géomembrane. Par conséquent,



▲ Photo 6 – Exemple de support trop agressif.

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 granulaires placées sur la pente soient auto-filtrantes vis-à-vis des risques d'érosion interne.

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.

Dans la majorité des cas des retenues d'altitude, le fond de forme doit être recouvert par 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.

Un géotextile anti-poinçonnant, assurant la protection de 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.).

Un géocomposite de drainage ou une couche drainante granulaire, intégré à la structure support, 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.

### Le drainage sous la géomembrane

Le drainage sous la géomembrane est une des fonctions que doit assurer la structure support. Ce drainage 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.

Il est à noter que, outre le drainage sous la géomembrane inclus dans le DEG, le drainage des retenues d'altitude comprend également le drainage des venues d'eau naturelles (talus en déblai, fond de la cuvette, fondation du remblai) et le drainage propre du remblai qui sont traités dans le guide à la section concernant la conception géotechnique de l'ouvrage.

La conception des dispositifs de drainage de l'eau (drainage inclus dans le DEG) intègre 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. Des éléments de choix entre ces deux types de matériaux sont donnés dans le guide.

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 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 son exutoire 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.

Le dispositif drainant joue un rôle fondamental pour l'auscultation de l'ouvrage. 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.

Delorme *et al.* (2009) présentent, avec la retenue de l'Adret des Tuffes, un exemple de retenue d'altitude où le DEG comporte une étanchéité par double géomembrane (problèmes de matériaux karstiques et présentant des risques de dissolution en fondation) et où une solution variante a été adoptée, avec le remplacement de matériaux granulaires drainants par des géocomposites.

### La structure de recouvrement

Le retour d'expérience a montré des dégradations plus ou moins importantes de la géomembrane liées à la glace sur la plupart des retenues d'altitude. Ce n'est que pour les retenues de basse et moyenne altitude, avec des supports sableux 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 de grosses épaisseurs de glace, même en moyenne altitude, et donc des dégradations plus importantes que celles constatées.

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 constatés de la glace sur ces aménagements, la mise en place d'une structure de recouvrement complète est recommandée par le guide, notamment pour les grands ouvrages et les petites retenues exposées à des effets de gel importants ou soumis à des vents forts, pour les avantages suivants, en service :

- 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 en cas de chute de remonter sur une protection en enrochements) ;
- stabilité au vent de la géomembrane ;
- résistance du support aux effets des vagues ;
- protection contre les ultra-violets ;
- protection contre les corps flottants.

Mais la structure de recouvrement doit être étudiée et mise en œuvre avec le plus grand soin. Le retour d'expérience a montré l'existence de problèmes liés à la mise en œuvre de cette structure : poinçonnements et glissements. 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 en service et la difficulté de sa réparation ;
- 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 ainsi que la présence d'interfaces peu frottantes entre géosynthétiques au sein du DEG, en particulier au contact des géomembranes lisses.

Le choix de ne pas recouvrir la géomembrane est réservé aux sites les moins exposés par rapport aux effets de la glace (faibles altitudes d'implantation et sites protégés des vents dominants) et en toute hypothèse pour des ouvrages de petites tailles. Ce choix s'appuie alors sur les avantages de cette solution : coût moins élevé, chantier plus court, examen visuel de la géomembrane possible et réparations plus aisées. Les inconvénients de la solution géomembrane exposée sont : une durabilité bien moindre, une sensibilité aux agents extérieurs (ultra-violets, glace, vagues, vents, vandalisme, etc.) et 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).

Parmi les exemples de matériaux de recouvrement possibles, on peut citer les enrochements (ou rip-rap), les matelas de gabions (ou matelas Reno), les dalles en béton préfabriquées ou coulées en place et les pavés en béton ; ces matériaux doivent être séparés de la géomembrane par une ou plusieurs couches intermédiaires, assurant en particulier la protection de la géomembrane.

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 lors de la mise en œuvre, doit être 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, épaisseur plus grande au pied du talus et diminuée en tête. La justification de la stabilité au glissement de la structure de recouvrement sur talus fait l'objet d'une norme AFNOR, à paraître, qui fixe les méthodes de calcul des efforts à reprendre en tête de talus et des dimensions de la tranchée d'ancrage correspondantes. Cette norme est intitulée « *Géosynthétiques-Géotextiles et produits apparentés – Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente – Justification du dimensionnement et éléments de conception* ».

Le guide détaille les points ci-dessus concernant la structure de protection ainsi que d'autres aspects tels que la mise en place d'une risberme, la recommandation de mettre en place l'interface la moins frottante au-dessus de la géomembrane (afin d'éviter les risques de mise en traction de celle-ci) et son dimensionnement vis-à-vis des vagues et de la glace.

Les publications de Delorme *et al.* (2009) et de Deroo et Lapeyre (2009) présentent deux exemples d'ouvrages où la géomembrane est recouverte ; la seconde concerne un cas d'utilisation d'un géosynthétique de renforcement pour assurer la stabilité de la structure de recouvrement.

## Contenu général du guide

Les trois points sur lesquels nous avons insisté dans la partie précédente, qui nous paraissent essentiels pour une bonne conception et une bonne réalisation de l'étanchéité des retenues d'altitude, ne constituent qu'une faible partie du présent guide de recommandations. Ce guide, qui est divisé en six parties détaillées ci-dessous, vise à constituer un manuel intégré pour la conception, la réalisation, la surveillance et la réhabilitation des retenues d'altitude. Il ne prétend pas constituer un référentiel technique complet et il renvoie chaque fois que nécessaire

à la littérature technique spécialisée dans les différents domaines abordés. Son objectif est avant tout de préciser, dans le contexte de la montagne, les règles de l'art pour la conception de petits barrages, le plus souvent munis d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane.

Le guide débute par une synthèse rapide du retour d'expérience des retenues d'altitude (*partie I*). On présente ici les pathologies et les défauts rencontrés régulièrement sur le parc existant, l'objectif étant ensuite de proposer des solutions techniques pour les prévenir.

La *deuxième partie* traite de l'évaluation des sites et des composants essentiels de leur évaluation : les impacts environnementaux du futur aménagement, les aléas auxquels il peut être exposé, l'onde de submersion et ses conséquences pour l'aval qui seraient engendrées par la rupture du barrage ou l'expulsion de son volume d'eau. Elle vise à donner aux maîtres d'ouvrages, et à leurs cabinets conseils, des éléments d'aide à la décision pour l'implantation d'un projet de retenue d'altitude.

La conception des retenues d'altitude est développée en *partie III*. Les règles de l'art applicables aux petits barrages sont rappelées et sont déclinées dans le contexte d'ouvrages hydrauliques en montagne. Le guide traite les aspects essentiels de la conception des retenues d'altitude, de leurs équipements et des ouvrages associés. Concernant l'étanchéité de la fondation et du remblai, il se focalise sur la conception de retenues étanchées par un dispositif d'étanchéité par géomembrane, qui constitue la solution privilégiée, et donc, sur la technologie des géosynthétiques. Le guide insiste également sur les aspects géotechniques essentiels pour ces ouvrages.

L'exécution des travaux et leur vérification de conformité méritent également une attention particulière en montagne, où les fenêtres saisonnières pour la réalisation des travaux sont très limitées (*partie IV*). On développe les aspects liés à l'organisation des chantiers, ainsi qu'à la première mise en eau.

La surveillance, l'exploitation et l'entretien des ouvrages en service font l'objet de la *partie V*. Ces activités sont développées au regard de la nouvelle réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques. On s'attache aux dispositions propres aux retenues d'altitude liées à leurs conditions difficiles d'exploitation hivernale.

De nombreuses retenues d'altitude souffrent de pathologies et de défauts de conception ou réalisation ; leur réhabilitation et remise à niveau s'imposent donc. La *partie VI* traite, sous forme de fiches de cas, les pathologies ou défauts couramment rencontrés : illustrations, mécanismes en jeu, conséquences potentielles et propositions de mesures correctives.

## Conclusion

Le travail réalisé par une équipe pluridisciplinaire a abouti à la rédaction du guide intitulé « Retenues d'altitude – Guide de recommandations - Évaluation des risques et des impacts, conception, réalisation, surveillance, réhabilitation » (Peyras et Mériaux, 2009).

Sur le volet essentiel des géosynthétiques, ce guide vise à apporter des réponses techniques à la problématique des DEG en conditions d'al-

titude. Il apporte également des réponses à la pathologie de l'endommagement du DEG qui est une problématique tout à fait importante de ces retenues.

En s'adressant principalement aux propriétaires et exploitants ainsi qu'aux bureaux d'études intervenant dans les différents domaines des retenues d'altitude, il a pour objectif une amélioration des conditions de conception, de réalisation, de surveillance et de réhabilitation de ces retenues dont le DEG constitue un élément crucial.

Les retenues d'altitude, malgré des volumes souvent modestes, induisent des risques potentiellement importants et peuvent être exposées aux aléas spécifiques aux zones de montagne. Le guide propose des réponses vis-à-vis de ces risques et le présent article met en avant les dispositions à prendre propres aux géosynthétiques dans ces ouvrages. □

## Résumé

L'article présente, à travers le récent guide de recommandations « *Retenues d'altitude* », la synthèse d'un retour d'expérience sur le comportement et la pathologie des dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG) en altitude. Il donne les recommandations fortes du guide relatives à ces dispositifs, en particulier sur la structure support, le drainage inhérent au DEG et la structure de recouvrement. Un descriptif général du guide termine l'article.

## Abstract

The paper presents parts of the recent guide of recommendations « *Mountain reservoirs* ». It makes a synthesis of a feedback on the behaviour and the pathology of geomembrane lining systems and gives the strong recommendations of the guide relative to these systems, in particular onto the structure support, the drainage inherent to the DEG and the covering structure. A general description of the guide ends the article.

### Bibliographie

AFNOR, norme XP G 38-066 (*parution prévue : 2010*), Géosynthétiques – Géotextiles et produits apparentés - Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente – Justification du dimensionnement et éléments de conception.

AFNOR, norme NF P 84-500, 1998, Géomembranes – Terminologie.

CFG, 1991, *Fascicule n° 10, Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes*, Comité français des géosynthétiques, 47 p.

CIGB, (*à paraître : en cours d'impression*), *Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages – Principes de conception et retour d'expérience*, Commission internationale des grands barrages.

DELORME, F., LOCHU, A., KRAEMER, P., SCUERO, A., VASCHETTI, G., PROST, S., RECALCATI, P., 2009, Retenue d'altitude de l'Adret des Tuffes : une étanchéité avec double géomembrane intégralement en géosynthétiques, Comité français des géosynthétiques (CFG), *in : Rencontres Géosynthétiques 09*, Nantes, 1-3 avril 2009, p. 233-244.

DEROO, L., LAPEYRE, O., 2009, Barrage des Blanchets : une étanchéité sous fortes contraintes, Comité français des géosynthétiques, *in : Rencontres Géosynthétiques 09*, Nantes, 1-3 avril 2009, p. 245-256.

LEFRANC, M., GIRARD, H., VASCHETTI, G., SCUERO, A., 2009, Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages, Comité français des géosynthétiques, *in : Rencontres Géosynthétiques 09*, Nantes, 1-3 avril 2009, p. 305-311.

MÉRIAUX, P., DEGOUTTE, G., GIRARD, H., PEYRAS, L., 2006, Sécurité et pathologie des barrages pour la production de neige de culture : premiers retours d'expérience, *Ingénieries Eaux-Agriculture-Territoires*, numéro spécial Géosynthétiques « Applications aux installations de stockage de déchets et aux ouvrages hydrauliques », p. 69-76.

PEYRAS, L., MÉRIAUX, P., 2009, *Retenues d'altitude*, Éditions Quæ, Versailles, France, 330 p.

SETRA/LCPC, 2000, *Étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier*, Service d'études techniques des routes et autoroutes – Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Guide technique, 95 p., Guide complémentaire, 71 p.