

Cinquante ans de différentes applications des géomembranes dans les barrages

Cet article est une version abrégée d'un article de Cazzuffi et al. (2010), et prolonge des articles antérieurs de Cancelli et Cazzuffi (1994) et de Giroud et Bonaparte (1993).

Les géomembranes, généralement associées à d'autres géosynthétiques, constituent l'étanchéité principale de presque trois cents barrages à travers le monde. Illustré par des exemples d'utilisation dans les différents types de barrages, en construction et en cours de réhabilitation, cet article nous renseigne sur les performances d'étanchéité et la durabilité des géomembranes dans les conditions d'utilisation sévères propres aux barrages.

L

'utilisation des géomembranes dans les barrages est une des applications majeures des géosynthétiques, notamment du fait de l'importance des barrages. Cet article présente divers aspects de la conception et de la construction des barrages avec étanchéité

par géomembrane. Il est illustré par des cas d'intérêt technique et historique, et par des informations provenant de la base de données de la Commission internationale des grands barrages (CIGB, 2010). Trois types de barrages sont considérés : les barrages en remblai (barrages en terre et en enrochements), les barrages en béton et maçonnerie, et les barrages en béton compacté au rouleau. Les nouvelles constructions et la réhabilitation de barrages existants sont traitées. En revanche, les batardeaux et le rehaussement des barrages existants ne sont mentionnés que brièvement, et seulement dans la mesure où il s'agit d'importantes innovations techniques.

Dans les barrages, les géomembranes remplacent des matériaux d'étanchéité traditionnels comme le béton, le béton bitumineux et l'argile.

Les géomembranes ont été adoptées dans le monde entier pour assurer l'étanchéité de tous les types de barrages, de même que l'étanchéité de tous les types d'ouvrages hydrauliques (réservoirs, bassins, lagunes, stations de pompage, canaux, tunnels), avec un total de plusieurs centaines de million de m² installés. On peut dire que les géomembranes ont été la plus importante innovation dans la construction des ouvrages hydrauliques depuis les années 1950.

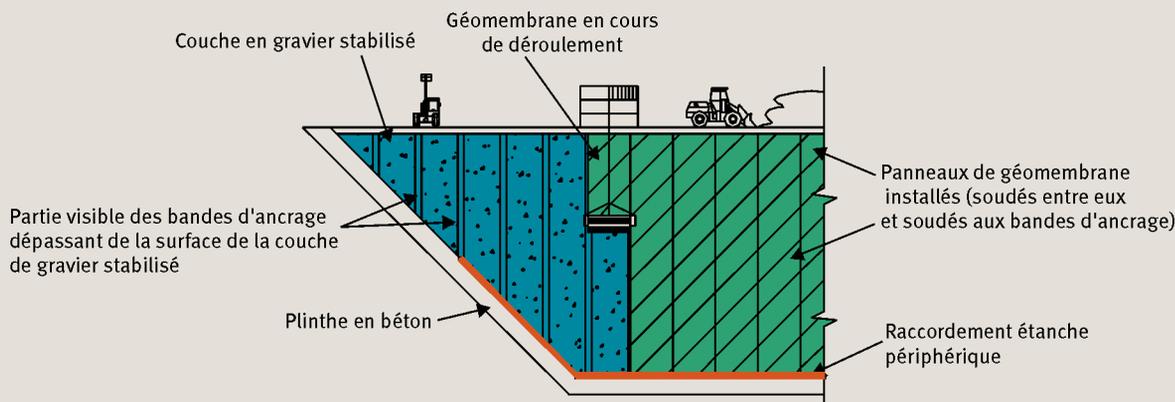
Selon la base de données de la CIGB, une géomembrane est la seule barrière étanche dans la quasi-totalité des 280 barrages répertoriés par cette commission. Beaucoup de ces barrages ont une grande hauteur. Il n'y a pas de limite à la pression d'eau que les géomembranes peuvent supporter. Ainsi, les hauteurs record sont pour le moment :

- 198 m pour un nouveau barrage en remblai (barrage de Karahnjukar, Islande, 2006, massif de pied et joint horizontal entre les dalles) ;
- 188 m pour un nouveau barrage en béton compacté au rouleau (Miel I, Colombie, 2002), avec une géomembrane sur toute la hauteur du barrage ;
- 200 m pour un nouveau barrage en béton (Kölnbreinsperre, Autriche, 1985, application partielle à la base) ;
- 174 m pour la réhabilitation d'un barrage en béton (Alpe Gera, Italie, 1994), avec la géomembrane couvrant la moitié inférieure de la face amont.

Il est important d'étudier les premières utilisations de géomembranes dans les barrages car cela donne l'occasion de tirer des leçons des succès et échecs en ce qui concerne, en particulier, les géomembranes (sélection, épaisseur, durabilité, protection), la conception (générale et détaillée) et les modes de dysfonctionnement.

Le barrage de Contrada Sabetta, construit en Italie en 1959, est le premier exemple d'utilisation de géomembrane dans un barrage. C'est un ouvrage remarquable parce qu'il est relativement haut et que la géomembrane est l'unique étanchéité du barrage (Cazzuffi,

1 Mise en place et soudure de la géomembrane aux bandes d'ancrage qui dépassent de la pente.



1987). C'est un barrage de 32,50 m de haut, en maçonnerie de pierres sèches, avec des pentes très raides : 1V :1H amont et 1V :1.4H aval. La géomembrane, de 2 mm d'épaisseur, est en polyisobutylène, un composé élastomérique qui n'est plus utilisé, non point à cause de sa performance, qui est satisfaisante (du moins lorsque la géomembrane est couverte), mais parce que les géomembranes modernes sont plus faciles à souder.

En 1960, une géomembrane PVC de 0,90 mm d'épaisseur fut utilisée sur un petit barrage en Slovaquie. Ensuite, pendant sept ans, aucune utilisation de géomembrane dans des barrages n'a été rapportée. À partir de 1967, avec le barrage de Miel, de 15 m de haut, en France, étanché par une géomembrane en butyle, on assiste à nouveau à des utilisations de géomembranes dans des barrages. Il s'agit encore de plusieurs barrages en remblai. Dès lors, le rythme de construction de barrages avec géomembranes s'accélère.

Dans les années 1970, on commença à utiliser des géomembranes pour la réhabilitation de barrages en béton. En effet, le béton des barrages se détériore progressivement à cause notamment du gel-dégel et, dans certains cas, de réactions alcali-granulats. Ces deux phénomènes sont liés à la présence d'eau dans le béton, ce qui est le cas du béton des barrages. Dans certains barrages construits dans les années 1920 ou 1930, le degré de détérioration du béton était tel dans les années 1970 qu'une réhabilitation était nécessaire. Et, pour séparer le béton de l'eau de la retenue, l'utilisation d'une géomembrane s'imposait. De surcroît, la géomembrane offre l'avantage de diminuer le débit de fuites (qui peut être important dans le cas de béton très détérioré).

Les premières utilisations eurent lieu dans les Alpes italiennes, en commençant par le barrage du Lago Baitone, construit en 1930 et réhabilité en 1971. La géomembrane (polyisobutylène 2 mm) fut laissée exposée sur la face quasi-verticale du barrage. Cette géomembrane fut endommagée par de la glace et des débris flottants. Elle fut remplacée en 1994 par une géomembrane PVC de 2 mm d'épaisseur laminée en usine avec un géotextile nontissé aiguilleté assurant protection et drainage. La première application entièrement couronnée de succès fut réalisée en 1976 au barrage du Lago Miller, 11 m (Alpes italiennes), avec une géomembrane PVC de 2 mm d'épaisseur, et en 1980 au barrage du Lago Nero, 45,50 m (Alpes italiennes), où pour

la première fois fut utilisée une géomembrane composite constituée d'une géomembrane PVC thermoliée en usine avec un géotextile nontissé aiguilleté assurant protection et drainage. Ce type de géomembrane sera ensuite utilisé avec succès dans de nombreux barrages de tous types.

Dans les années 1970 et 1980, huit grands barrages furent ainsi réhabilités dans les Alpes italiennes à plus de 2 000 m d'altitude. Dans tous ces barrages, la géomembrane PVC est exposée, à cette altitude, à des conditions sévères en termes de rayonnement ultraviolet, basses températures, gel-dégel et contact avec de la glace flottant à la surface du réservoir. Pour cette raison, des géomembranes PVC épaisses ont été utilisées (2 ou 2,50 mm), ce qui contrastait avec les épaisseurs faibles (0,75 ou 0,50 mm) des géomembranes alors utilisées dans de nombreux réservoirs. En effet, on était en droit de penser que, puisque l'un des mécanismes de vieillissement des géomembranes est la migration de constituants hors de la géomembrane, la durabilité pourrait être proportionnelle au carré de l'épaisseur, par analogie avec des phénomènes comme la consolidation des sols ou les transferts de chaleur.

De manière plus générale, la qualité de la géomembrane utilisée pour la réhabilitation de barrages en béton et la qualité de son installation ont contribué de façon importante à établir la crédibilité des géomembranes dans les barrages de tous types.

Au début des années 1980, la construction de barrages en béton compacté au rouleau a commencé. Dès 1984, une géomembrane a été utilisée pour l'étanchéité d'un barrage en béton compacté au rouleau : ce fut au barrage de Winchester (aujourd'hui Carrol Ecton, États-Unis). L'utilisation des géomembranes étant très bénéfique aux barrages en béton compacté au rouleau, un grand nombre de ces barrages ont été étanchés à l'aide de géomembranes et, depuis 2000, des barrages existants en béton compacté au rouleau ont eu leurs joints ou fissures réparés à l'aide de géomembranes. On peut dire que l'association des géomembranes et du béton compacté au rouleau a été la plus importante innovation dans l'art de construire les barrages depuis les années 1970.

Une autre date importante est celle de la première installation de géomembrane sous l'eau pour la réhabilitation d'un barrage. Ce fut en 1997, au barrage de Lost Creek, États-Unis (Cazzuffi *et al.*, 2010).

► Barrages en remblai

Selon la base de données de la CIGB, des géomembranes ont été utilisées dans plus de 160 barrages en remblai. C'est un succès remarquable, accompli surtout dans les trente dernières années. La distribution par type de géomembrane est la suivante si l'on ne considère que les 126 barrages dont la géomembrane a une épaisseur supérieure à 0,70 mm :

- PVC (acronyme anglais généralement utilisé pour chlorure de polyvinyle), 54 (43 %) ;
- géomembrane bitumineuse, 18 (14 %) ;
- PEHD (polyéthylène haute densité), 13 (10 %) ;
- butyle and autres élastomères, 11 (9 %) ;
- CSPE (acronyme anglais généralement utilisé pour polyéthylène chlorosulfoné), 7 (6 %) ;
- LLDPE (acronyme anglais généralement utilisé pour polyéthylène basse densité linéaire), 6 (5 %) ;
- PP (polypropylène), 6 (5 %) ;
- autres géomembranes fabriquées en usine, 2 (2 %) ;
- géomembranes fabriquées *in situ*, 9 (7 %).

On notera que les géomembranes fabriquées *in situ* ne sont pas traitées dans cet article.

Dans un barrage en remblai, on peut considérer deux positions pour la géomembrane : à la pente amont, couverte ou non, ou interne, c'est-à-dire située à l'intérieur du corps du barrage, inclinée, verticale ou quasi-verticale, en accordéon. Selon la base de données de la CIGB, dans 90 % des cas où une géomembrane est utilisée dans un barrage en remblai, elle se trouve au parement amont, et dans 10 % des cas elle est interne. Et, parmi les géomembranes situées à la pente amont, 70 % sont couvertes et 30 % exposées.

Barrages avec géomembrane exposée sur la pente amont

Environ 30 % des géomembranes utilisées à l'amont des barrages en remblai sont exposées. Ces géomembranes sont soumises à diverses actions potentiellement néfastes :

- dommages par actions mécaniques (impacts, abrasion) dues à diverses causes : glace, débris flottants, chutes de pierres, animaux, vandales, circulation, etc. ;
- dégradation par exposition aux agents de l'environnement (oxygène, ultra-violets, chaleur) ;
- déplacement par le vent, les vagues, les fluctuations du niveau de la retenue, la gravité (qui cause du fluage).

Seules des géomembranes ayant une résistance suffisante aux diverses causes de dégradation peuvent être utilisées exposées. De surcroît, il faut ancrer les géomembranes contre les actions du vent et de la gravité : la tension de la géomembrane générée par le vent est proportionnelle à la distance entre ancrages et au carré de la vitesse du vent. Par conséquent, si la vitesse du vent et la hauteur du barrage sont limitées, il peut suffire d'ancrer la géomembrane à la périphérie de la pente amont, tandis, dans les autres cas, les géomembranes exposées sont ancrées sur la pente du barrage, en plus de l'ancrage étanche à la périphérie que l'on trouve dans tous les barrages.

Géomembrane ancrée seulement à la périphérie de la pente amont

On a utilisé des géomembranes exposées ancrées seulement à la périphérie de la pente amont du barrage, généralement dans le cas de petits barrages pour les raisons indiquées précédemment. Le premier d'entre eux fut le barrage de Banegon, France, 17 m de haut, où une géomembrane bitumineuse fut installée en 1973.

Si le niveau d'eau dans la retenue doit demeurer au-dessus d'un certain niveau, on peut laisser la géomembrane non recouverte sous l'eau. Dans le cas des batardeaux, on laisse souvent la géomembrane non recouverte et ancrée seulement à la périphérie, un risque acceptable compte tenu de la brièveté de la durée de service d'un batardeau. C'est le cas du batardeau de Locone, construit en 1982 en Italie, et incorporé dans le barrage principal en 1986. Durant cette période, le batardeau a rempli sa fonction bien qu'ayant subi quelques dommages.

Ancrage par multiple tranchées ou poutres

L'ancrage d'une géomembrane sur la pente amont d'un barrage en remblai peut se faire par un système de tranchées ou de poutres parallèles ou quasi parallèles. Ces tranchées ou poutres sont en général horizontales ou quasi horizontales. Elles sont quelquefois placées suivant la pente.

Un exemple intéressant est celui du réservoir de Barlovento, de 27 m de profondeur, construit aux Iles Canaries, Espagne, dans le cratère d'un volcan éteint (Fayoux et Potié, 2006). La géomembrane (PVC 1,50 mm renforcée par un scrim polyester) est ancrée à quatre niveaux sur les pentes. Cette géomembrane installée en 1992 a subi des vents de 160 km/h sans dommage.

Ancrage à l'aide de bandes de géomembrane le long de la pente amont

Le système d'ancrage par bandes est relativement récent. L'étanchéité du barrage et son ancrage sont faits du même matériau. Étant entièrement réalisé en géomembrane, le système est très souple et peut suivre de grandes déformations du support (Scuero et Vaschetti, 2009).

Le système d'ancrage est constitué de bandes de géomembrane de 0,50 m de large environ placées le long de la pente amont. Une partie de la largeur de chaque bande est enfouie dans la couche superficielle de la pente amont du barrage et le reste de la largeur de la bande dépasse de la surface de la pente du barrage. L'espacement entre bandes d'ancrage dépend essentiellement de la résistance au soulèvement par le vent. La couche supérieure de la pente amont du barrage, dans laquelle les bandes d'ancrage sont partiellement enfouies, doit être assez rigide pour résister aux efforts d'arrachement des bandes d'ancrage dus au vent. De plus, cette couche doit, en général, être drainante. Cette couche peut donc être en gravier stabilisé par une légère dose de ciment ou de bitume.

Les rouleaux de géomembrane sont déroulés à partir de la crête du barrage, puis sont soudés à la partie des

bandes qui dépassent de la surface de la pente amont, et sont enfin soudés entre eux pour réaliser une étanchéité continue (figure ❶). Le système d'ancrage par bandes a été utilisé pour la première fois au réservoir de Kohrang, Iran, en 2004, où l'installation a été très rapide et moins coûteuse que les solutions traditionnelles.

Ancrage à l'aide de bandes de géomembrane et bordures en béton

Un système similaire à celui décrit dans la section précédente est celui de l'ancrage à l'aide de courtes bandes de géomembrane (environ 1,60 m de long) ancrées dans des poutrelles horizontales en béton poreux appelées « bordures » (figure ❷). La partie visible de chaque bande est soudée à la suivante, formant ainsi une bande continue de géomembrane le long de la pente. La géomembrane est ensuite soudée sur ces bandes comme cela est décrit à la section précédente. Cette méthode a été utilisée en 2008 à Sar Cheshmeh, Iran, pour la surélévation d'un barrage de stériles.

Barrages avec géomembranes couvertes à la pente amont

La protection des géomembranes exposées contre les actions listées plus haut est typiquement assurée en recouvrant la géomembrane d'une couche de matériau lourd et résistant, comme du béton ou un sol (plus particulièrement gravier et enrochements).

Plusieurs systèmes ont été, ou pourraient être, utilisés pour couvrir les géomembranes sur la pente amont des barrages en remblai : blocs de béton articulés, dalles de béton, géocellules ou géomatelas remplis de mortier, couches de sol (gravier et enrochements).

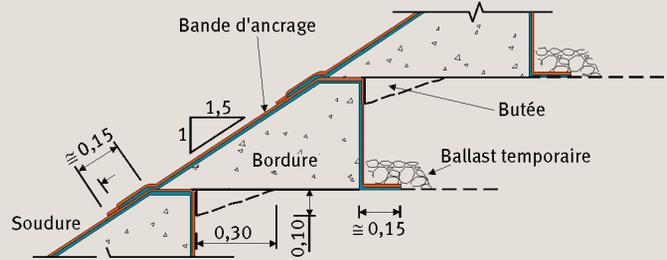
Il est important de noter que des couches « protectrices » improprement dimensionnées ou construites peuvent endommager les géomembranes pendant la construction ou en service. Par conséquent, un géotextile nontissé est généralement placé entre la géomembrane et le matériau qui la recouvre.

Blocs articulés en béton

Des blocs articulés en béton, reliés par des câbles ou un géotextile, sont une solution intéressante dans les cas où on ne doit protéger la géomembrane que dans la partie supérieure de la pente amont du barrage. En effet, ces systèmes peuvent être ancrés dans une tranchée d'ancrage en crête du barrage (ce qui est également le cas des couches de géocellules). Deux exemples :

- le barrage du Mas d'Armand, France (1981), un barrage en enrochements, 21 m, 1V :1.60H, où une géomembrane bitumineuse de 4,80 mm est couverte de blocs de 0,08 m d'épaisseur collés sur, et supportés par, un géotextile ancré en crête ;
- le barrage de Mauriac, France (1989), un barrage en enrochements, 14,50 m, 1V :1.70H, où une géomembrane bitumineuse de 3,90 mm est couverte de blocs de 0,12 m d'épaisseur connectés entre eux par des câbles d'acier ancrés en crête.

❷ Système de bordures et bandes d'ancrage.



Couvertures faites de dalles de béton

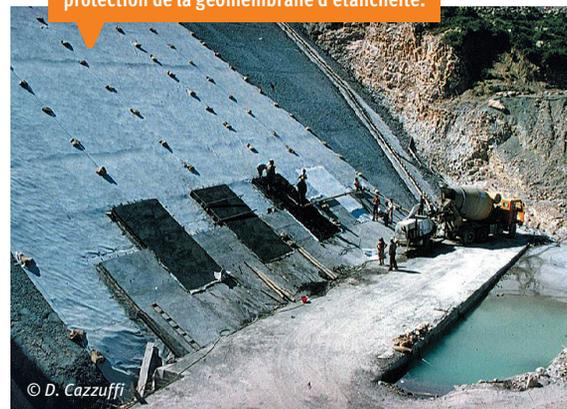
Des dalles de béton coulé en place sont le mode de couverture le plus typique pour les géomembranes en pente amont de barrage. On trouvera ci-dessous quelques exemples de barrages en remblai où la géomembrane située à la pente amont est recouverte de dalles de béton coulé en place : Contrada Sabetta, Italie (1959) ; Codole, Corse, France (1983) ; Figari, Corse, France (1993) ; Bovilla (photo ❶), Albanie (1996) ; Ortolo, Corse, France (2000) ; La Galaube (photo ❷), France (2000).

Sur la base de ces exemples et d'autres, il apparaît que la couverture la plus typique serait en béton non armé ou armé à l'aide de fibres de polypropylène. L'utilisation d'une armature métallique est déconseillée à cause du risque d'endommagement de la géomembrane au cours de la construction. L'épaisseur de béton la plus typique serait de l'ordre de 0,10 à 0,20 m, mais une épaisseur plus élevée est justifiée dans des cas spéciaux (par exemple, risque de chute de gros rochers se détachant des berges). Un géotextile nontissé aiguilleté indépendant, ayant une masse surfacique d'au moins 400 g/m², doit être interposé entre la géomembrane et les dalles de béton.

Couverture en béton contenu dans des géocellules ou des géomatelas

Une protection en mortier contenu dans des géocellules (structures géosynthétiques alvéolaires) ou des géo-

❶ Barrage de Bovilla pendant la mise en place de couches de béton comme protection de la géomembrane d'étanchéité.



2 Barrage de la Galaube pendant la mise en place de couches de béton comme protection de la géomembrane d'étanchéité.



© D. Cazzuffi

► matelas (structures géosynthétiques formés de deux couches de géotextiles servant de coffrage au mortier) a été utilisée dans de petits barrages (Cazzuffi et al., 2010). Ces protections sont typiquement ancrées en crête et peuvent donc être utilisées seulement dans la partie de la pente amont soumise aux vagues.

Couverture de géomembrane par couches de sol

Une couche de sol (par exemple, gravier et/ou enrochements) placée sur une géomembrane dans le cas des pentes amont très raides des barrages en enrochements ne serait pas stable. On ne peut utiliser de telles

couches que sur des pentes de 1V :2.0H et, de préférence, 1V :2.5H ou moins raides ; ce sont des pentes que l'on trouve dans les barrages en terre. Il est essentiel de vérifier la stabilité de ces couches en cas de vidange rapide et, dans certaines régions, en cas de séisme.

Au barrage d'Aubrac, France (1986), 15,00 m, 1V :2.5H, la coupe de haut en bas est la suivante (Alonso et al., 1993) :

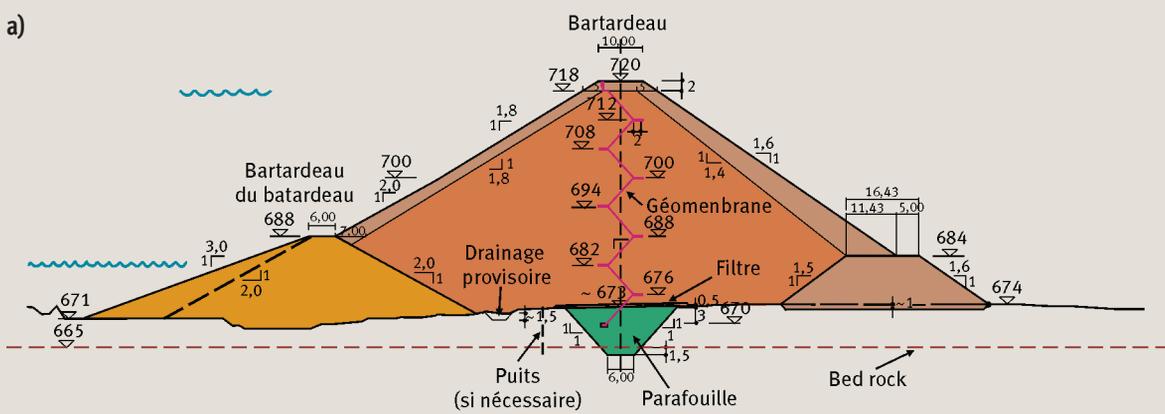
- 0,50 m d'enrochements 100-300 mm ;
- 0,20 m de gravier 0-25 mm ;
- géotextile nontissé aiguilleté (500 g/m²) ;
- géomembrane PVC 1,20 mm ;
- géotextile nontissé aiguilleté (500 g/m²) ;
- 0,20 m de couche drainante en gravier 0-25 mm.

Barrages avec géomembrane interne

Les barrages avec géomembranes internes ne comptent que pour 10 % des barrages en remblai avec géomembranes. Des exemples sont donnés ci-dessous.

Barrages avec une géomembrane interne inclinée

Le premier barrage avec géomembrane interne a été le barrage d'Odiel, de 41 m de haut, en Espagne, construit en 1970 avec une géomembrane CPE inclinée à 56°. Une géomembrane inclinée a été utilisée au barrage de Valence d'Albi, France, 16 m de haut, construit en



3 (a) Coupe typique du batardeau Gibe III.
(b) Vue du batardeau en construction.



© D. Cazzuffi

1988. La géomembrane est une géomembrane bitumineuse de 4 mm d'épaisseur, installée sur une pente de 1V :2,0H et couverte avec une zone de sol ayant une pente finale de 1V :2,5H au tiers supérieur de la pente et 1V :3,0H au deux tiers inférieurs. La géomembrane est en contact avec le sol compacté (un schiste de perméabilité moyenne). Ainsi, grâce à cette étanchéité composite, le débit de fuite en cas de défaut dans la géomembrane serait beaucoup plus faible que si la géomembrane était en contact avec un matériau drainant.

Barrages avec géomembrane centrale

Selon la base de données du CIGB, une géomembrane en position centrale a été utilisée en Chine dans trois nouveaux barrages avec des géomembranes PVC très minces (0,3 mm, 0,5 mm et 0,8 mm) et dans un batardeau avec une géomembrane PVC de 1,50 mm.

Un excellent exemple de géomembrane en position interne en forme d'accordéon (figure 3a) est le batardeau Gibe III, de 50 m de haut, en Éthiopie (Pietrangeli *et al.*, 2009). La géomembrane a été installée à partir du fond de la fouille jusqu'à la crête, suivant une géométrie en accordéon (zigzag). La première phase de remblai avait 6 m de haut et les phases suivantes, 12 m (figure 3b). Les panneaux de géomembrane ont été soudés entre eux à plat sur la crête temporaire du remblai à la fin de chaque phase.

Réhabilitation de barrages en remblai

Pour la réhabilitation de barrages en enrochements avec masque amont en béton ou béton bitumineux, la situation est la même que pour la réhabilitation de barrages en béton : il s'agit de fixer une géomembrane sur un matériau rigide. La géomembrane étant généralement fixée à de nombreux endroits, il n'est pas nécessaire de la recouvrir pour empêcher son soulèvement par le vent. Par conséquent, les géomembranes utilisées pour la réhabilitation de barrages en enrochements avec masque amont en béton ou béton bitumineux sont généralement laissées exposées.

Quelques tentatives de collage de géomembrane au béton ont été un échec. Cet échec peut être attribué à la qualité des géomembranes et adhésifs utilisés. Mais on peut aussi l'attribuer à une cause fondamentale : il est déconseillé de placer un matériau étanche sur un autre à cause du risque de séparation des deux matériaux par la pression des liquides ou gaz emprisonnés entre les deux. Aujourd'hui, le collage des géomembranes sur le béton où le béton bitumineux étanche ne se pratique plus. On utilise des fixations mécaniques en veillant à avoir un matériau drainant entre la géomembrane et le béton ou le béton bitumineux étanche.

Performance des barrages en remblai avec géomembrane

Un débit de fuite typique, observé dans le cas de barrages en remblai construits avec une géomembrane à la pente amont et revêtue d'une couverture, est de l'ordre de 1 litre/h/m² dans les meilleurs cas et 10 litres/h/m² dans le cas des barrages qui n'ont pas la meilleure

performance (en supposant que les mesures sont exactes, ce qui n'est pas certain). Par comparaison, un calcul pour défaut de 2 mm de diamètre par 1 000 m² de géomembrane donne un débit de fuite de 0,10 litre/h/m² avec une hauteur d'eau de 10 m, et 0,20 litre/h/m² avec une hauteur d'eau de 50 m. Il est possible que des fuites à la périphérie de la géomembrane expliquent la différence entre valeurs calculées et observées.

Barrages en béton et maçonnerie

Il est important de minimiser la perméabilité des barrages en béton pour les raisons suivantes :

- pour minimiser les pertes d'eau, ce qui semble être la raison principale, mais ne l'est pas car les fuites d'eau à travers les barrages en béton sont faibles ;
- pour minimiser le risque de détérioration du béton, ce qui est, en général, la raison principale ;
- pour minimiser les sous-pressions qui tendent à soulever le barrage ;
- pour éviter l'apparition de traces de suintement sur la face aval, ces traces ayant un effet néfaste sur le public.

Les modes de détérioration du béton dans les barrages et leurs conséquences sont les suivants :

- si de l'eau s'est infiltrée dans les pores du béton, en cas de gel, cette eau augmente de volume, ce qui peut briser le béton. Au dégel, le béton se disloque ;
- la percolation d'eau à travers le béton peut entraîner les fines particules du béton, ce qui se traduit par une augmentation de la perméabilité du béton et un risque de colmatage des drains ;
- la réaction alcali-granulats se produit entre les ions alcalins du ciment et les granulats (essentiellement les granulats siliceux). Cette réaction ne se fait que si de l'eau transporte les ions. Petit à petit, les granulats se détériorent et un gel qui gonfle en présence d'eau peut se former. Il en résulte une diminution de la résistance mécanique du béton et une augmentation de sa perméabilité.

L'utilisation de géomembranes pour la réhabilitation des barrages en béton et maçonnerie a été un immense succès. Étant donné ce succès, on peut concevoir que les géomembranes soient utilisées dans la construction de nouveaux barrages en béton et maçonnerie.

Dans la plupart des cas, la géomembrane est installée le long de l'entière face du barrage. On n'a signalé que deux cas où la géomembrane avait été installée sur une portion de la face d'un barrage en béton ou maçonnerie pour réparer un joint ou une fissure. Les géomembranes utilisées pour la réhabilitation des barrages en béton et maçonnerie sont indiquées dans le tableau 1. On note dans ce tableau que les géomembranes PEHD et bitumineuses ne sont pas utilisées dans cette application.

Comme le montre le tableau 1, les géomembranes utilisées dans les barrages en béton sont quasiment toujours exposées. Les seuls cas de géomembranes recouvertes pour lesquels on dispose d'information sont des applications localisées en pied amont.

► Des barrages en béton d'une hauteur remarquable ont été réhabilités avec une géomembrane, comme le barrage de Kölnbreinsperre (Autriche) et le barrage d'Alpe Gera (Italie). Dans les deux cas, la géomembrane a été installée dans la partie inférieure du barrage, subissant ainsi la pression la plus élevée.

La géomembrane est dans la quasi-totalité des cas installée à sec, après vidange du réservoir sur toute la hauteur où la géomembrane doit être installée.

La technologie la plus fréquente

La même technologie a été utilisée dans près de 90 % des réhabilitations de barrages en béton et maçonnerie. Cette technologie est caractérisée par le type de géomembrane utilisée, la mise en place de la géomembrane, le système de fixation de la géomembrane, le joint périphérique, et le drainage derrière la géomembrane.

La géomembrane utilisée est appelée « géomembrane composite », car elle est constituée de deux composants : une géomembrane et un géotextile thermoliés l'un à l'autre. Les lés de cette géomembrane composite ont une largeur de 2,10 m. Le composant géomembrane, qui a une épaisseur de 2 à 3 mm, est constitué de PVC plastifié à très haute stabilité. Le composant géotextile est un géotextile nontissé aiguilleté avec une masse surfacique de 200 à 700 g/m² selon la pression d'eau et les irrégularités du support. Le géotextile est en polyester ou polypropylène. On doit utiliser du polypropylène si le géotextile doit être en contact avec du ciment. Le géotextile renforce la géomembrane, réduisant ainsi le fluage de la géomembrane lorsqu'elle est installée verticalement, protège la géomembrane des irrégularités du support et contribue au drainage derrière elle.

Pour la mise en place dans les barrages poids et les barrages voûte, les rouleaux de géomembrane, fabriqués à la longueur requise pour éviter les soudures horizontales,

sont déroulés verticalement depuis la crête du barrage et sont fixés contre la face du barrage à l'aide des profilés qui sont ancrés au béton formant des lignes verticales parallèles (figure 4a). Cependant, la mise en place de la géomembrane se fait horizontalement si la géométrie du barrage l'exige, comme dans le cas des barrages à voûtes multiples.

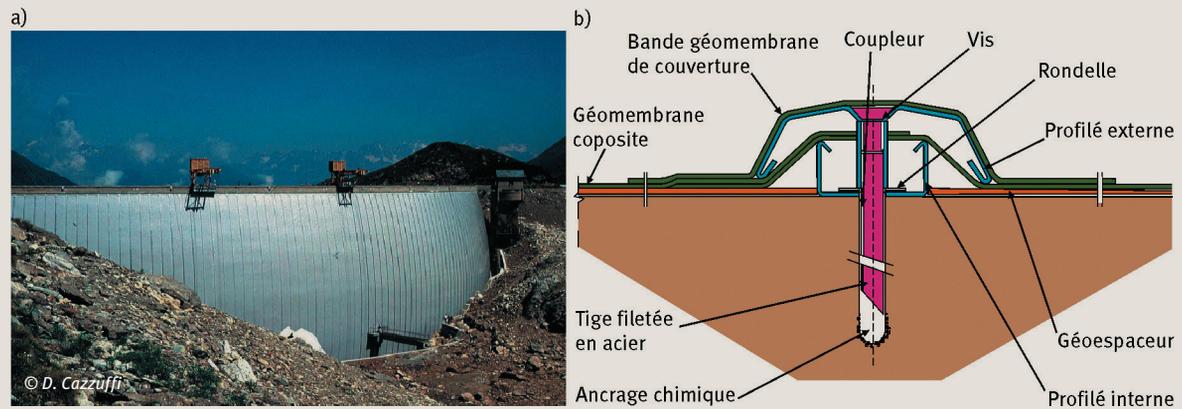
Il est nécessaire de fixer la géomembrane sur la face amont pour éviter son déplacement par le vent et les vagues, ainsi que pour l'empêcher de fluer lorsqu'elle est installée verticalement. Dans un cas, la géomembrane a été collée sur la face du barrage : au barrage de Zolezzi, en Italie. Dans tous les autres cas, la fixation a été mécanique. Dans presque tous les cas, le système de fixation-tension breveté décrit ci-dessous est utilisé. Ce système comprend deux profilés en acier inoxydable : un profilé interne en U ancré sur la face du barrage et un profilé externe en Ω placé au-dessus du profilé interne en U, avec la géomembrane entre les deux (figure 4b). La géométrie des deux profilés est telle que, lorsqu'ils sont connectés, ils soumettent la géomembrane à une tension. Cette tension réduit l'affaissement de la géomembrane dû à la gravité, réduit les mouvements et déformations de la géomembrane en cas de vent et de vagues, et empêche la formation de plis dans la géomembrane qui favorisent l'adhérence de la glace dans les climats froids et l'endommagement par les débris flottants. En plus de la fixation de la géomembrane, les profilés créent des conduits verticaux qui contribuent au drainage.

Un joint périphérique empêche l'infiltration d'eau derrière la géomembrane. Ce joint, classique dans toutes les installations de géomembranes, consiste à serrer le bord de la géomembrane entre le béton de la plinthe périphérique et une latte en acier inoxydable, avec interposition de rubans synthétiques assurant l'étanchéité.

1 Géomembranes utilisées dans les barrages en béton.

Type de barrage	Géomembrane	PVC (chlorure de polyvinyle)	LLDPE (polyéthylène basse densité linéaire)	CSPE (polyéthylène chlorosulfoné)	CPE (polyéthylène chloré)
Poids	Exposée	31	0	0	0
	Couverte	1	0	0	0
Contrefort	Exposée	3	0	0	0
	Couverte	0	0	0	0
Voûte	Exposée	3	0	1	0
	Couverte	0	2	1	1
Voûtes multiples	Exposée	9	0	0	0
	Couverte	0	0	0	0
Total	Exposée	46	0	1	0
	Couverte	1	2	1	1

4 (a) Face amont d'un barrage réhabilité montrant les lignes verticales parallèles formées par les fixations mécaniques. (b) Coupe du système patenté de fixation mécanique.



Il y a toujours un drainage entre la face du barrage et la géomembrane. Ce drainage comprend :

- le géotextile qui fait partie de la géomembrane composite ;
- un espace vide entre la géomembrane et la face du barrage (dont l'épaisseur dépend de la pression exercée par l'eau) ;
- un géotextile nontissé épais utilisé, dans certains cas, pour protéger la géomembrane et qui contribue au drainage ;
- lorsqu'une grande capacité de drainage est requise, une couche drainage géosynthétique, typiquement un géoespaceur ;
- les conduits formés par les profilés ;
- un ou plusieurs tuyaux collecteurs à la base du barrage ;
- des tuyaux d'évacuation vers l'aval ou vers une galerie.

Le système de drainage empêche l'accumulation, entre la géomembrane et le barrage, de liquide qui soulèverait la géomembrane en cas de vidange rapide du réservoir, permet de mesurer la performance de la géomembrane et draine l'eau qui, au cours des années, s'est accumulée dans le barrage. A ce sujet, lorsque le réservoir est vide, l'eau présente dans le barrage migre vers la face amont dont la température est élevée. L'eau qui a ainsi migré est collectée par le système de drainage. Cet assèchement progressif du béton a les effets bénéfiques suivants :

- réduction de la pression interstitielle dans le barrage et, par conséquent, réduction du risque de soulèvement du barrage ;
- suppression de l'entraînement de particules fines du béton par l'eau ;
- ralentissement de la réaction alcali-granulats.

Préparation de la surface pour la réhabilitation des barrages en béton ou maçonnerie

Barrages en béton

Dans le cas des barrages en béton, la préparation de la surface du barrage avant installation de la géomembrane composite comprend les opérations suivantes :

- décapage à l'eau sous haute pression pour enlever les morceaux de béton instables et les corps étrangers ;
- remplissage des cavités profondes par du mortier, si nécessaire ;
- mise en place d'un géotextile nontissé aiguilleté épais ou autre géosynthétique, si nécessaire, en cas de surface très irrégulière.

Barrages en maçonnerie

L'état de surface des barrages en maçonnerie requiert généralement la mise en place d'un géotextile nontissé aiguilleté épais pour protéger la géomembrane. Un exemple remarquable est le barrage de Kadamparai en Inde (67 m de haut et 478 m de longueur en crête) où un géotextile nontissé aiguilleté en polyester de 2 000 g/m² a été placé sur la maçonnerie extrêmement irrégulière avant l'installation d'une géomembrane composite constituée de PVC thermolié à un géotextile (photo 3). La réhabilitation a été effectuée en trois mois sur la face verticale de 17 300 m². Le débit de fuite, qui était de 130 litres/m²/h, est devenu 0,1 litre/m²/h après réhabilitation.

Barrages avec face en béton projeté

Certains barrages en béton ou maçonnerie ont été revêtus autrefois de béton projeté afin d'augmenter leur étanchéité. Tôt ou tard, ces barrages doivent être réhabilités. Dans le cas des barrages avec face en béton projeté, il peut être nécessaire d'enlever tout le béton projeté si celui-ci est en mauvais état, ce qui fait apparaître le béton ou la maçonnerie. Il y a ensuite deux possibilités pour la préparation de la surface avant mise en place de la géomembrane :

- ▶ • soit remplacer le béton projeté par une nouvelle couche de béton projeté ;
- soit placer, sur le béton ou la maçonnerie du barrage, un géotextile épais pour protéger la géomembrane des irrégularités du support.

Barrages en béton compacté au rouleau

Avantages de l'étanchéité par géomembrane

L'utilisation d'une géomembrane à l'amont est l'une des méthodes pour assurer l'étanchéité des barrages en béton compacté au rouleau. Cette méthode a plusieurs avantages :

- elle réduit les sous-pressions à la base du barrage et au niveau des surfaces de contact entre couches de béton compacté qui se trouvent tous les 0,30 m, donc elle réduit le risque de soulèvement ;
- elle réduit les écoulements préférentiels au niveau des surfaces de contact entre couches de béton compacté et à travers les fissures thermiques, réduisant ainsi le risque

de transport de fines particules de ciment (transport qui affaiblit le béton et qui risque de colmater les drains) ;

- elle évite les problèmes liés au comportement dans le temps des joints de dilatation et des joints entre le béton compacté au rouleau et les ouvrages en béton conventionnel, puisque ces joints sont séparés de l'eau du réservoir par la géomembrane (Scuero & Vaschetti, 2009).

Méthodes d'étanchéité par géomembrane des barrages en béton compacté au rouleau

Il y a deux méthodes pour l'étanchéité des barrages en béton compacté au rouleau.

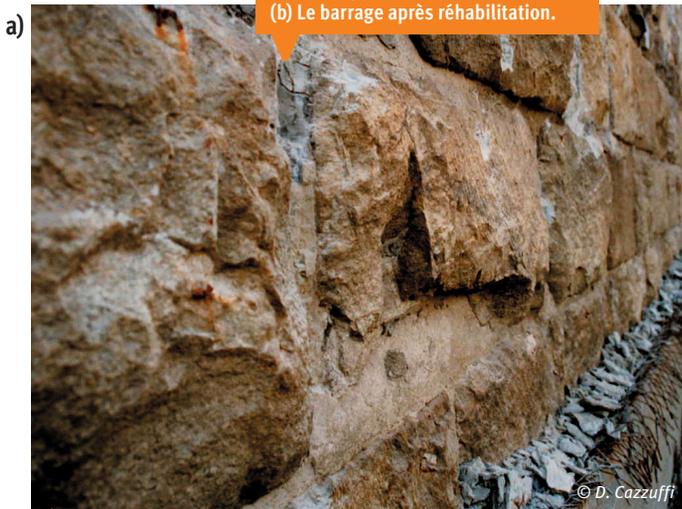
La méthode la plus ancienne (Méthode Winchester) consiste à utiliser des panneaux préfabriqués en béton comme coffrage côté amont pour la mise en œuvre du béton compacté au rouleau (photo 4a). Ces panneaux (qui sont ancrés au béton que l'on est en train de compacter) sont revêtus de géomembrane sur leur face en contact avec le béton compacté au rouleau. Les joints entre panneaux sont recouverts d'une bande de géomembrane soudée. Avec cette méthode, la géomembrane est installée avant la mise en place du béton compacté au rouleau, et elle est protégée des agressions extérieures par les panneaux de béton.

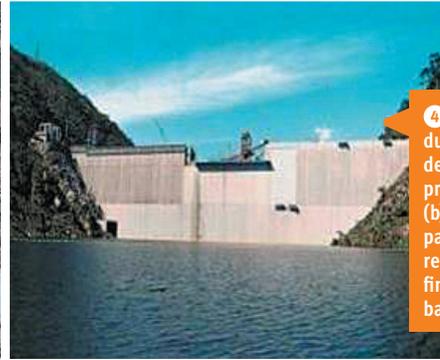
L'autre méthode consiste à installer la géomembrane verticalement, après la mise en place du béton compacté au rouleau. L'installation est alors identique à l'installation de géomembrane pour la réhabilitation de barrages existants en béton. Cependant, dans le cas de très hauts barrages, il est intéressant d'un point de vue économique de commencer à installer la géomembrane lorsque la mise en place du béton compacté au rouleau a atteint une certaine hauteur. L'installation de la géomembrane se fait alors à partir d'une passerelle temporaire. C'est ce qui a été fait au barrage de Miel, Colombie, 188 m de haut, dont le réservoir a pu être partiellement rempli avant la fin de la construction (photo 4b).

Utilisation de géomembranes dans les barrages en béton compacté au rouleau

Une récapitulation des utilisations de géomembranes pour l'étanchéité des barrages en béton compacté au rouleau est présentée dans le tableau 2. Les géomembranes sont utilisées essentiellement pour de nouveaux barrages où la géomembrane est, dans la quasi-totalité des cas, installée sur toute la hauteur du barrage. Il y a encore peu de réparations de barrages en béton compacté au rouleau car ce type de barrage est relativement récent. D'après les données disponibles, on ne compte que trois réparations (dont une sous l'eau) à l'aide de géomembranes de barrages béton compacté au rouleau construits sans géomembrane. Le tableau montre que les deux méthodes décrites plus haut sont utilisées en quantités à peu près égales, et que, dans presque tous les cas, une géomembrane PVC est utilisée.

3 (a) État de surface du barrage de Kadamparai avant réhabilitation.
(b) Le barrage après réhabilitation.





4 (a) Compactage du béton derrière des panneaux préfabriqués. (b) Réservoir partiellement rempli avant la fin des travaux au barrage de Miel.

a)

b)

Géomembranes utilisées dans les barrages

Sélection des géomembranes utilisées dans les barrages

Sans traiter cette question en détail, on peut cependant noter les conditions particulières d'utilisation des géomembranes dans les barrages :

- grande hauteur ;
- pression hydrostatique ;
- support rigide ;
- grande étendue du réservoir ;
- alimentation du réservoir par un cours d'eau ;
- haute altitude ;
- absence de produits chimiques.

Il faut donc que les géomembranes soient capables de résister à toutes ces conditions.

Dans bien des cas, la géomembrane doit avoir une combinaison optimale de résistance et de déformabilité : pour résister au poinçonnement, pour ponter des fissures, pour bien se comporter aux raccordements entre un support qui se déforme sous la pression de liquide et un ouvrage rigide. Ceci peut être quantifié par la co-énergie de la courbe tension-déformation de la géomembrane (Giroud, 2005).

Durabilité des géomembranes dans les barrages

Grâce aux études faites pour l'utilisation des géomembranes dans les structures de stockage de déchets, on dispose aujourd'hui de nombreuses données générales sur la durabilité des différents types de géomembranes. Il est intéressant, ici, de mentionner des essais faits sur des échantillons prélevés dans des géomembranes utilisées dans des barrages. Ceci a été fait pour plusieurs barrages en Italie (Cazzuffi, 1987) dans le cas de barrages réhabilités à l'aide de géomembrane PVC exposée à haute altitude où le rayonnement ultraviolet est intense et les conditions climatiques très dures. À partir de ces données, il a été possible de conclure que la durée de service de ces géomembranes est supérieure à cinquante ans (Hsuan *et al.*, 2008). Il convient de noter que ces données ont été obtenues sur des géomembranes installées dans les années 1970 et 1980, et que les géomembranes du même type fabriquées aujourd'hui sont de meilleure qualité et probablement plus durables. Il est important de remarquer que le béton des barrages réhabilités à l'aide de ces géomembranes s'était détérioré au cours d'une période de quinze à soixante ans. Il est donc clair que la durabilité des géomembranes est au moins égale à celle du béton (du moins le béton utilisé dans les années 1950) dans les conditions d'utilisation des barrages.

2 Géomembranes utilisées dans les barrages en béton compacté au rouleau.

Position de la géomembrane	Exposition	PVC (chlorure de polyvinyle)	LLDPE (polyéthylène basse densité linéaire)	PEHD (polyéthylène haute densité)
Face entière	Exposée	15	0	0
	Couverte	19	1	1
Joints	Exposée	3	0	0
	Couverte	0	0	0
Fissures	Exposée	3	0	0
	Couverte	0	0	0

Types de géomembranes utilisées dans les barrages

Compte tenu des considérations sur la sélection des géomembranes et des informations sur leur durabilité, il n'est pas étonnant que les données de la CIGB montrent que les géomembranes utilisées dans les barrages sont, en majorité, des géomembranes ayant une grande capacité de déformation. C'est le cas, notamment, des géomembranes PVC, et en particulier celles thermoliées à un géotextile nontissé aiguilleté. Celles-ci ont une grande déformabilité et, en même temps, une courbe tension-déformation quasi-linéaire avec une grande co-énergie.

D'après les données de la CIGB, 91 % des barrages avec géomembranes sont étanchés par des géomembranes polymériques et 9 % par des géomembranes bitumineuses. Les géomembranes PVC sont de loin les géomembranes les plus utilisées dans les barrages : environ 65 % des barrages avec géomembranes ont une géomembrane PVC (qui est souvent thermoliée à un géotextile nontissé aiguilleté). Il apparaît donc que la situation dans les barrages est très différente de la situation dans le génie de l'environnement (stockage de déchets ou produits industriels), où les géomembranes utilisées sont souvent des géomembranes en polyéthylène du fait de leur résistance chimique.

Conclusions

Les géomembranes sont utilisées dans tous les types de barrages. Dans cet article, on a montré que la durabilité des géomembranes, dans les conditions d'utilisation

sévères propres aux barrages, est au moins égale à la durabilité du béton. Les informations fournies dans cet article montrent que la performance des géomembranes dans les barrages est généralement excellente si leur sélection et leur mise en œuvre sont appropriées. En particulier, le débit de fuites à travers les barrages avec géomembrane est très nettement inférieur au débit de fuites à travers les barrages conventionnels, même les barrages en béton.

Ainsi, cet article montre clairement que l'utilisation des géomembranes dans les barrages est maintenant une technique bien établie. ■

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les maîtres d'ouvrages, les concepteurs, les administrations et les associations qui ont autorisé la publication de données dans cet article.

Les auteurs

Daniele CAZZUFFI

CESI SpA, via Rubattino 54, I-20134 Milan, Italie

✉ cazzuffi@cesi.it

Jean-Pierre GIROUD

JP GIROUD, INC., Ocean Ridge, États-Unis

✉ jpg@jpgiroud.com

Alberto SCUERO et Gabriella VASCHETTI

Carpi Tech, via Passeggiata 1, 6828 Balerna, Suisse

✉ alberto.scuero@carpitech.com

✉ gabriella.vaschetti@carpitech.com

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- 📄 **ALONSO, E., DEGOUTTE, G., GIRARD, H.**, 1993, Réalisation et comportement d'ouvrages hydrauliques munis d'une géomembrane, in : *Comptes Rendus de Rencontres 93*, vol. 2, p. 285-294.
- 📄 **CANCELLI, A., CAZZUFFI, D.**, 1994, Environmental aspects of geosynthetic applications in landfills and dams, in : *Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore*, vol. 4, p. 1299-1337.
- 📄 **CAZZUFFI, D.**, 1987, The use of geomembranes in Italian dams, *International Water Power & Dam Construction*, vol. 39, n° 3, p. 17-21.
- 📄 **CAZZUFFI, D., GIROUD, J.P., SCUERO, A., VASCHETTI, G.**, 2010, Geosynthetic barriers systems for dams, Keynote Lecture, in : *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Guaraja*, vol. 1, p. 115-163.
- 📄 **CIGB, COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES**, 2010, *Bulletin 135. Geomembrane sealing systems for dams - Design principles and return of experience*, Paris, 464 p.

► Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr



Les géomembranes sont également utilisées pour assurer l'étanchéité des bassins de stockage d'eau potable.