

EMPLOI DES GÉOMEMBRANES DANS LES BARRAGES : 50 ANS DE DIFFÉRENTES APPLICATIONS DANS LE MONDE

USE OF GEOMEMBRANES IN DAMS : 50 YEARS OF DIFFERENT APPLICATIONS IN THE WORLD

Daniele CAZZUFFI¹, Jean-Pierre GIROUD², Alberto SCUERO³, Gabriella VASCHETTI³

¹ CESI SpA, Milano, Italie

² JP GIROUD, INC., Ocean Ridge, Etats Unis

³ Carpi Tech, Balerna, Suisse

RÉSUMÉ – Dans presque 300 barrages au monde, des géomembranes constituent l'étanchéité principale. La géomembrane est généralement associée à d'autres géosynthétiques remplissant diverses fonctions. Cet article passe en revue les utilisations des géomembranes dans les différents types de barrages : barrages en remblai (en terre et en enrochements), barrages en béton et maçonnerie, barrages en béton compacté au rouleau. L'article traite de la conception et de la construction des barrages ainsi que de la sélection des géomembranes et de leur performance (notamment étanchéité et durabilité). L'article est illustré par des exemples de construction de nouveaux barrages et de réhabilitation de barrages anciens.

Mots-clés : géomembrane, barrage, étanchéité, construction, réhabilitation.

ABSTRACT – In almost 300 dams worldwide, geomembranes are the main waterproofing component. The geomembrane is generally associated with other geosynthetics performing various functions. In this paper, uses of geomembranes in the various types of dams are reviewed. The types of dams reviewed include: embankment dams (earth and rockfill dams), concrete and masonry dams, and roller-compacted concrete (RCC) dams. Design and construction aspects are considered, as well as selection of geomembranes and performance (including seepage control and durability). The paper is illustrated using examples of new dams and rehabilitation of existing dams.

Keywords: geomembrane, dam, waterproofing, construction, rehabilitation.

1 Introduction

L'utilisation des géomembranes dans les barrages est une des applications majeures des géosynthétiques, notamment du fait de l'importance des barrages. Cet article est une version abrégée d'un article de Cazzuffi et al. (2010) et prolonge des articles antérieurs de Cancelli & Cazzuffi (1994) et Giroud & Bonaparte (1993).

Divers aspects de la conception et de la construction des barrages avec étanchéité par géomembrane sont présentés dans cet article, qui 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 ; Scuero & Vaschetti, 2006). 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.

2 Histoire et développement

2.1 Concept de l'utilisation des géomembranes dans les barrages

Les géomembranes remplacent dans les barrages des matériaux d'étanchéité traditionnels comme le béton, le béton bitumineux et l'argile. Tandis que le concept de l'utilisation des géomembranes dans les barrages découle du succès des géomembranes dans les réservoirs, l'utilisation de bandes synthétiques ("waterstop") pour assurer l'étanchéité des joints de dilatation de nombreux barrages en béton depuis

longtemps a certainement contribué à faciliter l'acceptation dans les barrages de matériaux d'étanchéité synthétiques.

Il y a de nombreuses applications de géomembranes dans les barrages en remblais car ces barrages sont souvent très perméables et peuvent donc bénéficier d'un élément étanche additionnel. De surcroît, dans de nombreux cas, une géomembrane est plus économique et plus facile à installer qu'un matériau d'étanchéité traditionnel.

On a utilisé des géomembranes dans les barrages en remblai avant qu'elles ne soient utilisées dans les barrages en béton, probablement parce que l'installation d'une géomembrane sur la pente d'un barrage en remblai : (i) est semblable à son installation sur les pentes d'un réservoir en terre ; (ii) est plus simple que sur la face verticale d'un barrage en béton.

2.2 Premières utilisations de géomembranes dans les barrages

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, 1987). C'est un barrage de 32,5 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.

Quelques particularités du barrage de Contrada Sabetta sont les suivantes :

- la géomembrane comprend deux couches identiques collées l'une à l'autre à la périphérie (soit une épaisseur totale de géomembrane de 4 mm). Au total 3900 m² de géomembrane furent installés sur la face amont de 1900 m² ;
- la géomembrane inférieure est collée à l'aide d'un adhésif bitumineux sur le matériau support de 0,1 m d'épaisseur fait de béton poreux, lui-même reposant sur des dalles de béton de 0,25 m, elles-mêmes reposant sur la maçonnerie de pierres sèches ;
- la géomembrane est couverte par des dalles non-armées de 2 m × 2 m, et 0,2 m d'épaisseur, coulées sur place. Les joints ouverts permettent la libre circulation de l'eau et confèrent quelque flexibilité à la protection en cas de tassement. Une feuille de carton bitumineux avait été placée sur la géomembrane pour la protéger lors du coulage des dalles de béton.

En 1960 une géomembrane PVC de 0,9 mm d'épaisseur fut utilisée sur un petit barrage en Slovaquie (Note : les acronymes désignant les géomembranes sont définis à la Section 3.1). 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 butyl, 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.

2.3 Des barrages en remblai aux autres types de barrages

2.3.1 Utilisation de géomembranes pour la réhabilitation de barrages existants en béton

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 20 ou 30, 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, un barrage poids en béton construit en 1930 et réhabilité avec une géomembrane 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, également dans les Alpes Italiennes, avec une géomembrane PVC de 2 mm d'épaisseur et en 1980 au barrage du Lago Nero, 45,5 m, également dans les 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 (Cazzuffi, 1993). 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 2000 m d'altitude. Dans tous ces barrages, la géomembrane PVC est exposée, ce qui, à cette altitude, impose des conditions sévères en termes de rayonnement ultraviolet, basses températures, gel-dégel et contact avec de la glace flottant à la surface du réservoir (du moins dans le cas des barrages qui ne sont pas équipés de système par air comprimé qui empêche la présence de glace près de la face amont). Pour cette raison, des géomembranes PVC épaisses ont été utilisées (2 ou 2,5 mm), ce qui contrastait avec les épaisseurs faibles (0,75 ou 0,5 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.

Le fait que les géomembranes se trouvent sur la face amont quasi verticale des barrages en béton rend nécessaire la fixation des géomembranes pour éviter leur déplacement par les vagues et le vent, ainsi que pour réduire leur affaissement dû à la gravité. Le système utilisé pour la première fois au barrage du Lago Nero est devenu le système le plus utilisé pour la fixation des géomembranes sur les faces verticales (voir Section 4.2.4).

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.

2.3.2 Utilisation de géomembranes pour l'étanchéité de barrages en béton compacté au rouleau

La construction de barrages en béton compacté au rouleau a commencé au début des années 1980. 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 appelé barrage Carrol Ecton), un nouveau barrage, aux États-Unis. L'utilisation des géomembranes étant très bénéfique aux barrages en béton compacté au rouleau (voir Section 5), 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.

2.3.3 Installation de géomembrane sous l'eau

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, aux États-Unis (Cazzuffi et al., 2010).

2.3.4 Situation actuelle

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 mètres carrés 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 des Phases 1 et 2.) ;
- 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.

3 Barrages en remblai

3.1 Utilisation des géomembranes dans les 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 30 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 0,7 mm :

- PVC (acronyme anglais généralement utilisé pour chlorure de polyvinyle), 54 (43%),
- Géomembrane bitumineuse, 18 (14%)
- PEHD (polyéthylène haute densité), 13 (10%)
- Butyl et 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.

3.2 Conception des nouveaux barrages en remblai

3.2.1 Position de la géomembrane

Dans un barrage en remblai, on peut considérer deux positions pour la géomembrane: (1) la géomembrane peut être sur la pente amont, couverte ou non ; ou (2) la géomembrane peut être interne, c'est-à-dire située à l'intérieur du corps du barrage, inclinée, verticale ou quasi-verticale.

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 sur la pente amont et, dans 10% des cas, elle est interne. Et, parmi les géomembranes situées sur la pente amont, 70% sont couvertes et 30% exposées.

On peut faire les commentaires suivants sur les géomembranes internes.

- Une géomembrane interne peut être associée à un sol de faible perméabilité sans risque de soulèvement par sous-pressions (voir Section 3.2.3), en supposant que le poids des matériaux situés au-dessus de la géomembrane est suffisant pour contrebalancer les sous-pressions, ce qui est toujours le cas si la géomembrane est verticale ou quasi-verticale. On peut ainsi réaliser une étanchéité composite, ce qui minimise le débit de fuites.
- La géomembrane est protégée des agressions externes (voir Section 3.3.1), en supposant que les matériaux en contact avec la géomembrane ont été mis en place sans endommager la géomembrane et ne contiennent pas d'éléments susceptibles de l'endommager dans le futur.
- Le risque de soulèvement de la géomembrane par le vent est éliminé.
- Une géomembrane interne inclinée a une surface plus faible, donc un coût moindre, qu'une géomembrane située sur la pente amont.
- Une géomembrane verticale a une surface plus faible qu'une géomembrane inclinée et surtout qu'une géomembrane située sur la pente amont. Cependant, cet avantage disparaît en grande partie si la géomembrane quasi-verticale est en accordéon (ou "zigzag"). De plus, le coût plus élevé (voir ci-dessous) d'une installation verticale ou quasi verticale peut annuler le bénéfice résultant du moindre coût du matériau.
- La construction d'un barrage avec une géomembrane verticale ou quasi-verticale est généralement plus difficile que la construction d'un barrage avec une géomembrane située sur la pente amont ou avec une géomembrane interne inclinée. De plus, une coordination entre l'entrepreneur de terrassements et l'installateur de géomembrane est nécessaire dans le cas d'une géomembrane en accordéon. Par conséquent, le coût de construction est généralement plus élevé pour un barrage avec géomembrane verticale ou quasi-verticale que pour un barrage avec géomembrane inclinée.

En particulier, les raccordements d'une géomembrane en accordéon avec des structures annexes est difficile. Cependant, dans le cas des batardeaux où il n'y a pas de structure annexes, une géomembrane quasi-verticale en accordéon peut être envisageable.

- Les géomembranes verticales ou quasi-verticales ont l'inconvénient que la pression hydrostatique exercée par l'eau de la retenue est horizontale, ce qui est moins favorable à la stabilité que la pression inclinée exercée sur une géomembrane inclinée, surtout si elle est située sur la pente amont.
- Du point de vue de la stabilité du barrage, une géomembrane située sur la pente amont a deux avantages importants : (1) le poids total du barrage contribue à la stabilité ; (2) il n'y a pas de pression interstitielle dans le barrage.
- Une géomembrane quasi-verticale en accordéon, qui n'est pas raccordée à des ouvrages annexes rigides, est peu sensible aux tassements différentiels.
- Si le réservoir doit être revêtu d'une géomembrane, il est alors logique de placer la géomembrane sur la pente amont du barrage.

Étant donné qu'il n'est généralement pas avantageux de placer la géomembrane en position interne, il y en a peu d'exemples (voir Section 3.5). Lorsqu'une géomembrane est sur la pente amont, elle est soit exposée (voir Section 3.3) soit couverte (voir Section 3.4).

3.2.2 Conséquences des fuites et nécessité de leur prévention

La conception d'un barrage avec une étanchéité de tout type doit être telle que l'écoulement de liquide dans le barrage résultant d'une défaillance majeure de l'étanchéité ne puisse pas causer la rupture du barrage ou un désordre important de la structure du barrage. Par conséquent, le corps du barrage doit comprendre des zones de filtres pour empêcher son érosion interne. Ceci est particulièrement important lorsque la géomembrane est exposée, car une géomembrane exposée peut être endommagée. Les géomembranes sont bien plus imperméables que les autres étanchéités mais elles ont plus de chances d'être endommagées par des actions mécaniques

Si un barrage ne remplit pas les conditions ci-dessus concernant la résistance à l'érosion interne, une solution envisageable consiste à minimiser les fuites ; ce qui présente d'autres avantages comme minimiser les pertes d'eau et minimiser les pressions interstitielles. Deux méthodes peuvent être considérées au niveau de la conception : une étanchéité composite ou une double étanchéité.

Cependant, un barrage bien conçu ne doit pas donner lieu à de l'érosion interne. Par conséquent, il est rare d'avoir besoin d'une étanchéité composite ou d'une double étanchéité dans un barrage. Au contraire, dans un réservoir, une stricte prévention des fuites est souvent nécessaire car le concepteur n'a qu'une connaissance limitée du sol sous le réservoir, et ce sol peut être sensible à l'érosion interne.

Étanchéité composite et double étanchéité sont traitées dans les deux sections suivantes.

3.2.3 Utilisation d'une étanchéité composite pour minimiser les fuites

Le terme étanchéité composite est généralement utilisé pour désigner une étanchéité constituée d'une géomembrane sur une couche minérale de faible perméabilité (par exemple, argile compactée ou bentonite faisant partie d'un géocomposite bentonitique). Le débit de fuite à travers une étanchéité composite est nettement plus faible qu'à travers une géomembrane seule avec les mêmes défauts dans la géomembrane (Giroud, 1997 ; Giroud & Bonaparte, 1989a, 1989b ; Touze-Foltz & Giroud, 2003).

Il est très important de noter qu'une étanchéité composite ne doit pas être placée sur la pente amont d'un barrage. La raison est la suivante : pendant l'opération normale d'un barrage, à cause d'une fuite même petite, à travers la géomembrane ou contournant la géomembrane, de l'eau peut s'accumuler entre la géomembrane et la couche minérale sous-jacente qui a une faible perméabilité ; en cas de vidange rapide du réservoir, la pression de l'eau ainsi emprisonnée n'est plus équilibrée par la pression de l'eau du réservoir ; selon la quantité d'eau emprisonnée et le poids des matériaux sus-jacents, un glissement peut se produire à l'interface entre les deux composants de l'étanchéité composite. Et, même si un glissement ne se produit pas, la géomembrane et les matériaux sus-jacents peuvent se soulever, ce qui peut causer des déformations permanentes ou des fissures. Il faut noter que ce problème a été soulevé dès que le concept d'étanchéité composite a été présenté (Giroud & Bonaparte, 1989b).

Par conséquent, le poids des matériaux situés sur la géomembrane doit excéder les forces engendrées par la pression de l'eau qui pourrait être emprisonnée entre les deux composants de l'étanchéité composite. De plus, la contrainte normale exercée par les matériaux situés au-dessus de la géomembrane limite la quantité d'eau qui pourrait être emprisonnée sous la géomembrane.

La conclusion de cette discussion est qu'une étanchéité composite ne peut être utilisée que si une charge suffisante la recouvre. Une exception à cette conclusion serait l'utilisation de valves pour relâcher

la pression de l'eau emprisonnée, mais on ne connaît pas d'exemple d'utilisation de cette méthode. Il est important de noter que cette conclusion s'applique d'une manière générale dès que deux étanchéités quelconques sont superposées (soit intentionnellement, soit par inadvertance).

Au barrage de Worster, aux Etats Unis, la géomembrane (bien que recouverte par 0,3 m de sol) a été soulevée lors de la première vidange du réservoir (Johnson, 2010). De l'eau avait été emprisonnée dans une couche de sol non drainée entre la géomembrane et une ancienne étanchéité en béton. Ainsi, par inadvertance, une étanchéité composite avait été réalisée. On notera aussi qu'une couche de sol de 0.3 m est très insuffisante pour s'opposer à une pression d'eau établie sur plusieurs mètres.

Dans les nouveaux barrages en remblai, les couches situées sous la géomembrane doivent être suffisamment perméables pour éviter toute accumulation d'eau. Dans le cas de la réhabilitation de barrages, la couche sur laquelle on installe la géomembrane a souvent une faible perméabilité ; dans ce cas, une couche drainante est nécessaire entre la géomembrane et son support.

3.2.4 Utilisation d'une double étanchéité pour minimiser les fuites

Le terme "double étanchéité" désigne un système de deux étanchéités avec une couche drainante entre les deux pour assurer une charge de liquide extrêmement faible sur l'étanchéité secondaire, ce qui minimise le débit de fuite en cas de défaut dans l'étanchéité (Giroud, 1973). De surcroît, "l'étanchéité secondaire établit une distinction entre les eaux provenant d'une fuite à travers l'étanchéité primaire, qui vont vers un premier collecteur, et les eaux qui viennent du terrain et qui sont dirigées vers un second collecteur, à moins qu'elles ne retournent au terrain" (Giroud, 1973). Ce système est utilisé très fréquemment dans les structures de stockage de déchets et est également utilisé dans les réservoirs. Comme cela a été indiqué à la Section 3.2.2, il est extrêmement rare d'avoir besoin d'une double étanchéité dans un barrage, mais il est souvent justifié d'utiliser une double étanchéité si le réservoir du barrage est entièrement revêtu d'étanchéité. C'est le cas du réservoir de l'Adret des Tuffes, France (Delorme et al., 2009).

3.3 Barrages avec géomembrane exposée sur la pente amont

3.3.1 Discussion générale

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, UV, 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. Comme cela a été montré par Giroud et al. (1995), 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. Ce cas sera présenté à la Section 3.3.2.

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. Divers systèmes d'ancrage seront présentés dans cet article : ancrage par multiple tranchées ou poutres (Section 3.3.3) ; ancrage par bandes (Section 3.3.4) ; ancrage par bandes et bordures (Section 3.3.5).

L'ancrage par collage, clouage ou profilés sera traité à la Section 3.6 à propos de la réhabilitation des barrages en remblai avec un masque amont étanche rigide (béton ou béton bitumineux). Cependant, on peut concevoir que de tels ancrages soient utilisés dans le cas de nouveaux barrages en remblai lorsque le matériau situé sous la géomembrane est un matériau drainant rigide comme du béton bitumineux poreux ou du béton poreux)

Quel que soit le système d'ancrage, le vent soulève la géomembrane entre les ancrages. Il est important que la géomembrane retourne à sa position initiale après le soulèvement. À ce propos, il faut se souvenir de l'incident survenu lors de la construction du barrage de Figari, France, en 1991 (Tisserand, 1993). La géomembrane PVC de 2 mm d'épaisseur fut soulevée par le vent sans dommage important, mais le géotextile (400 g/m²) indépendant sous-jacent fut complètement désorganisé. Il a fallu enlever la géomembrane pour remettre le géotextile en place. Dans cette opération, il a fallu remplacer presque la moitié de la géomembrane. La leçon à retenir est qu'il ne faut pas avoir de géotextile

indépendant sous une géomembrane susceptible de se soulever. Ainsi, au barrage de Codole, France, le soulèvement pendant la construction de la géomembrane composite (PVC thermolié à un géotextile nontissé) ne s'est traduit par aucune perte de matériau. Le fait d'utiliser une géomembrane thermoliée à un géotextile a un autre avantage : le risque de fluage de la géomembrane est pratiquement éliminé. Pendant la construction du barrage de Figari, la géomembrane PVC non renforcée s'est allongée de 2 m sur une longueur de pente de 65 m, la pente étant de 1V :1,7H. Il a fallu enlever 2 m de géomembrane au bas de la pente pour pouvoir raccorder la géomembrane à la plinthe. La température élevée lors de l'installation ne peut expliquer que moins de 0.5 m de dilatation thermique. Le reste était dû au fluage (favorisé d'ailleurs par la température).

3.3.2 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 à la Section 3.3.1. 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.

3.3.3 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. L'espacement entre ancrages est déterminé en utilisant la méthodologie développée par Giroud et ses collaborateurs (Giroud et al., 1995 ; Giroud et al., 1999 ; Giroud et al., 2006 ; Giroud, 2009 ; Zornberg & Giroud, 1997).

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 & Potié, 2006). La géomembrane (PVC 1,5 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.

3.3.4 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. Etant entièrement réalisé en géomembrane, le système est très souple et peut suivre de grandes déformations du support (Scuero & Vaschetti, 2009).

Le système d'ancrage est constitué de bandes de géomembrane de 50 cm 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 (il est déterminé à l'aide de la méthodologie mentionnée à la Section 3.3.3). La couche supérieure de la pente amont du barrage dans laquelle les bandes d'ancrage sont partiellement enfoncées 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 dépasse de la surface de la pente amont et sont enfin soudés entre eux pour réaliser une étanchéité continue (Figure 1a).

Le système d'ancrage par bandes a été utilisé pour la première fois au réservoir de Kohrang, Iran, en 2004 (Figure 1b) où l'installation a été très rapide et moins coûteuse que les solutions traditionnelles. La géomembrane utilisée est une géomembrane composite constituée d'une géomembrane PVC (2 mm d'épaisseur) thermoliée à un géotextile nontissé de 500 g/m². L'espacement entre les bandes d'ancrage (calculé comme indiqué ci-dessus) est de 8 m sur les pentes et 16 m au fond.

Grâce à sa flexibilité, le système de géomembrane et bandes d'ancrage a bien résisté aux déformations différentielles entre le barrage et les structures en béton, alors que des fissures se sont produites dans les structures en béton. Ceci est d'autant plus remarquable que la température était très basse (-37°C) lorsque certaines déformations se sont produites, température à laquelle les géomembranes sont moins flexibles qu'à température ordinaire.

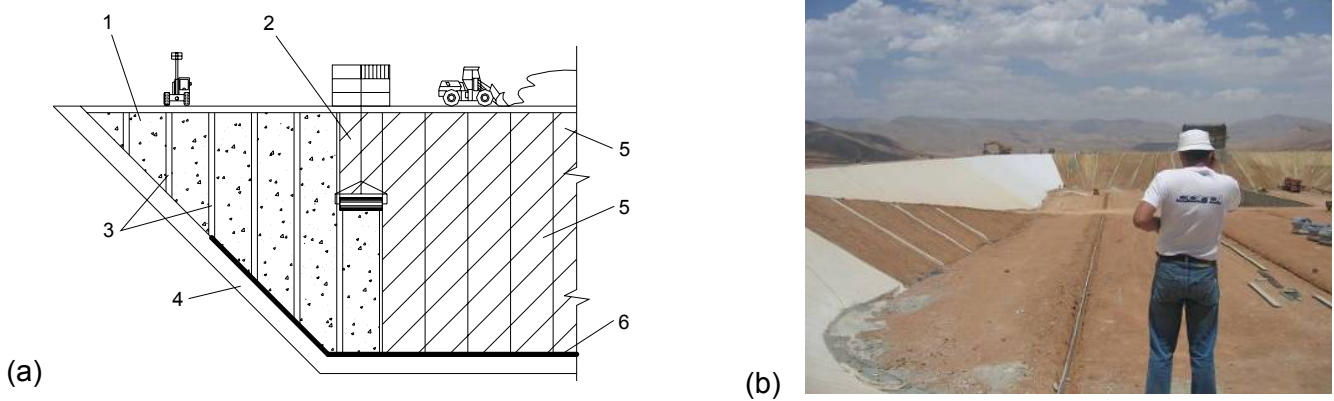


Figure 1. (a) Mise en place et soudure de la géomembrane aux bandes d'ancrage qui dépassent de la pente. Légende : 1. Couche en gravier stabilisé. 2. Géomembrane en cours de déroulement. 3. Partie visible des bandes d'ancrage dépassant de la surface de la couche de gravier stabilisé. 4. Plinthe en béton. 5. Panneaux de géomembrane installés (soudés entre eux et soudés aux bandes d'ancrage). 6. Raccordement étanche périphérique. (b) Réservoir de Khorang où les bandes d'ancrage sont visibles sur les pentes et au fond.

3.3.5 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 1,6 m de long) ancrés dans des poutrelles horizontales en béton poreux appelées "bordures" (Figure 2a). 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 (Figure 2b).

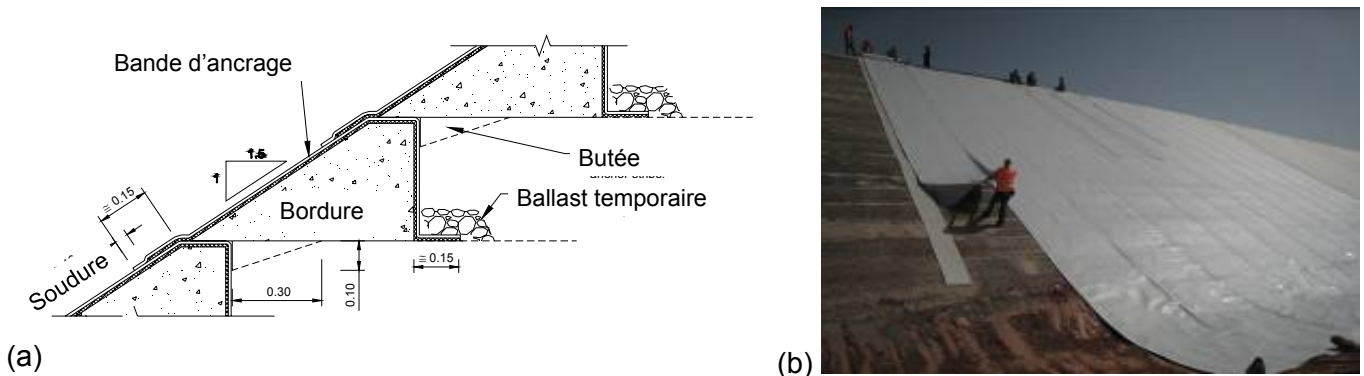


Figure 2. (a) Système de bordures et bandes d'ancrage. (b) Barrage de stériles de Sar Cheshmeh, Iran, où l'on voit la mise en place de la géomembrane et, à gauche, une bande d'ancrage.

3.4 Barrages avec géomembranes couvertes sur la pente amont

3.4.1 Discussion générale

Si une géomembrane est exposée sur la pente amont d'un barrage en remblai, elle est soumise à un certain nombre d'actions néfastes qui peuvent l'endommager. Ces actions sont listées au début de la Section 3.3.1. La protection des géomembranes contre ces actions 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). Selon les données de la CIGB, environ 70% des géomembranes utilisées à l'amont des barrages en remblai sont couvertes. Ce pourcentage élevé s'explique par le nombre et la sévérité des actions néfastes potentielles

Plusieurs systèmes ont été, ou pourraient être, utilisés pour couvrir les géomembranes sur la pente amont des barrages en remblai : blocs de béton autobloquants (voir Section 3.4.2) ; blocs de béton articulés (voir Section 3.4.3) ; dalles de béton (voir Section 3.4.4) ; béton projeté sur géotextile (voir Section 3.4.5) ; géocellules ou géomatelas remplis de mortier (voir Section 3.4.6) ; couches de sol (gravier et enrochements) (voir Section 3.4.7).

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.

La mise en place de la couche recouvrant une géomembrane est la phase la plus critique de la construction d'un système de géomembrane couverte. Les opérations d'assurance de qualité de construction ne doivent pas s'arrêter après la mise en place de la géomembrane. Elles doivent se poursuivre durant la mise en place de la couche couvrant la géomembrane.

L'importance du rôle du géotextile lorsque le barrage est en service est illustrée par le fait que la géomembrane n'a pas été endommagée en dépit de grands déplacements des blocs en béton au barrage de l'Ospedale (voir Section 3.4.2). La nécessité d'une protection est illustrée également par le fait qu'en l'absence de géotextile la géomembrane a été poinçonnée par les angles des dalles de protection au barrage de Bitburg, en Allemagne.

3.4.2 Exemple de couverture par blocs autobloquants

Au barrage de l'Ospedale (26 m de haut, 135 m de longueur en crête, construit en 1978, en Corse), la géomembrane bitumineuse de 4,8 mm d'épaisseur est couverte de blocs autobloquants en béton (0,20 m × 0,12 m et 0,08 m d'épaisseur). Ces blocs ne sont pas rectangulaires. Leur forme leur permet de s'imbriquer mutuellement, d'où le terme "autobloquant". Ces blocs ont été placés à la main sur un géotextile nontissé en polypropylène de 400 g/m² placé sur la géomembrane. Le géotextile est indépendant à la fois de la géomembrane et des blocs et ses fonctions sont les suivantes : (1) protéger la géomembrane pendant la mise en place des blocs et pendant que le barrage est en service ; (2) permettre un libre déplacement des blocs par rapport à la géomembrane. La stabilité des blocs sur la pente à 1V:1,7H est assurée par le fait qu'ils s'appuient sur la plinthe située au bas de la pente

Quatre ans après la construction, une tempête enleva quelques milliers de blocs à peu près au niveau de l'eau. Le géotextile a été déplacé dans une partie de la zone où les blocs ont été enlevés et était en place dans le reste de la zone. La géomembrane n'a pas été endommagée, ce qui montre que le géotextile a rempli sa fonction.

Il s'est avéré que les blocs utilisés au barrage de l'Ospedale étaient trop légers pour résister aux vagues (En fait, les blocs utilisés au barrage de l'Ospedale étaient assez petits et auraient pu être utilisés pour paver des allées, d'où la terminologie "pavés autobloquants" qui était employée). De plus, on a compris après l'accident qu'ils étaient mal imbriqués à cause d'un alignement imparfait au cours de leur mise en place et à cause de mouvements dus aux dilatations et contractions thermiques.

Les leçons à retenir du barrage de l'Ospedale sont les suivantes : (1) les blocs utilisées au barrage de l'Ospedale étaient trop légers ; (2) il est difficile d'aligner proprement des blocs autobloquants sur une grande surface ; (3) les phénomènes de dilatation-contraction peuvent désorganiser des blocs surtout si la surface couverte est grande ; (4) par conséquent, la solution de couverture par blocs autobloquants n'est viable que sur des pentes amont relativement petites (ou divisées en zones assez petites par un quadrillage de poutres en béton) et avec des blocs plus lourds qu'au barrage de l'Ospedale.

3.4.3 Blocs articulés en béton

Des blocs articulés en béton, reliés par des câbles ou un géotextile sont une solution intéressante dans les cas où l'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, voir Section 3.4.6). Deux exemples :

- le barrage du Mas d'Armand, France (1981), un barrage en enrochements, 21 m, 1V:1,6H, où une géomembrane bitumineuse de 4,8 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, 14,5 m, 1V:1,7H, où une géomembrane bitumineuse de 3,9 mm est couverte de blocs de 0,12 m d'épaisseur connectés entre eux par des câbles d'acier ancrés en crête.

3.4.4 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 sur la pente amont est recouverte de dalles de béton coulé en place:

- Contrada Sabetta (1959), Italie (voir Section 2.2), dalles de béton non armé de 2 m × 2 m et 0,2 m d'épaisseur. Les joints entre dalles sont laissés ouverts sur 1 mm et ne sont pas remplis de matériau poreux ; une feuille de carton bitumineux est entre les dalles et la géomembrane.

- Codole (1983), Corse, France, 28 m, 460 m de longueur en crête, 1V:1,7H, dalles de béton de 4 m de large, continues le long de la pente, avec une épaisseur de 0,14 m, armées de barres d'acier ; joints le long de la pente, 20 mm remplis de polystyrène expansé ; géotextile nontissé aiguilleté en polypropylène de 400 g/m² indépendant entre le béton et la géomembrane (PVC 1,9 mm thermolié à un géotextile nontissé aiguilleté) (Giroud, 1983 ; Tisserand et al., 1997).
- Figari (1993), Corse, France, 35 m, 1V:1,7H, 150 m de longueur en crête, dalles de béton de 5 m x 5 m et 0,14 m d'épaisseur, renforcées par des fibres de polypropylène ; géotextile nontissé aiguilleté en polypropylène de 400 g/m² indépendant entre la géomembrane (PVC 2 mm) et le béton (Tisserand, 1993).
- Bovilla (1996), Albanie, 91 m, 1V:1,55H dans les 40% supérieurs de la pente et 1V:1,6H dans les 60% inférieurs ; dalles de béton, 6 m le long de la pente et 3 m horizontalement, 0,2 m d'épaisseur dans la partie supérieure de la pente et 0,3 m dans la partie inférieure ; joints horizontaux remplis d'une couche de géotextile nontissé aiguilleté polypropylène de 350 g/m² ; joints le long de la pente remplis de trois couches du même géotextile ; géotextile nontissé aiguilleté en polypropylène de 800 g/m² entre la géomembrane et le béton ; en plus, sous les joints, protection en polystyrène pour éviter que les bords des dalles ne causent des contraintes concentrées dans la géomembrane (Sembenelli et al., 1998).
- Ortole (2000), Corse, France, 37 m, 1V:1,7H, 157 m de longueur en crête, dalles de béton de 0,14 m d'épaisseur, renforcées par de fibres de polypropylène ; géotextile nontissé aiguilleté en polypropylène de 400 g/m² indépendant entre la géomembrane bitumineuse de 5 mm d'épaisseur et le béton (Tisserand et al., 1997).
- La Galaube (2000), France, 43 m, 1V:2,0H, dalles de béton de 10 m le long de la pente et 5 m horizontalement, 0,1 m d'épaisseur, renforcé par des fibres de polypropylène ; à chaque joint horizontal, les dalles sont décalées latéralement de 2,5 m, ce qui est esthétiquement plaisant et permettra d'enlever quelques dalles facilement si une réparation de la géomembrane était nécessaire ; géotextile nontissé aiguilleté de 300 g/m² indépendant entre le béton et la géomembrane bitumineuse (Gautier et al., 2002).

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 0,1 à 0,2 m, mais une épaisseur plus élevée est justifiée dans des cas spéciaux (par exemple, risque de chute de gros rochers se détachant des berges). Une épaisseur plus élevée peut également être justifiée pour des raisons structurelles dans la partie basse de la couche de béton si celle-ci assure la butée en pied de l'ensemble de la couche. Dans tous les cas, la couche de béton est divisée en dalles par des joints pour deux raisons: (1) pour permettre la dissipation des sous-pressions en cas de vidange rapide du réservoir ; (2) pour conférer une certaine souplesse à la couche de béton afin de lui permettre de s'adapter aux mouvements différentiels. On peut considérer que des joints typiques ont de l'ordre de 3 à 10 mm d'ouverture et sont remplis de plusieurs couches de géotextile nontissé aiguilleté. Les dimensions typiques des dalles sont de 5 à 10 m dans le sens de la pente et de 3 à 5 m dans la direction horizontale. Le décalage des dalles d'une demi-largeur horizontalement à chaque niveau de joint horizontal est à considérer pour permettre d'enlever des dalles sans nuire à la stabilité (et l'on peut imaginer d'autres géométries comme des dalles cruciformes ou hexagonales). 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.

Voici quelques informations supplémentaires sur les deux plus hauts barrages mentionnés ci-dessus :

- au barrage en enrochements de Bovilla, 91 m, Albanie (Figure 3a), une géomembrane a été préférée à un masque amont en béton pour les raisons suivantes : (1) inquiétude sur la qualité du béton ; (2) risque de fissuration du béton ; (3) réduction du temps de construction ; (4) réduction du coût (Sembenelli et al., 1998). La géomembrane installée en 1996 est le seul élément d'étanchéité. Elle s'étend de la crête au massif de pied, soit sur une hauteur de 54 m. C'est une géomembrane composite constituée de PVC de 3 mm d'épaisseur thermolié à un nontissé polyester de 700 g/m². Cette géomembrane est placée sur une couche de gravier stabilisé au coulis de ciment.
- le barrage de La Galaube, 43 m de haut, est un barrage en enrochements, construit en France en 2000. C'est le plus haut barrage avec une géomembrane bitumineuse (Gautier et al., 2002). Cette géomembrane, de 5 mm d'épaisseur, se trouve sur une couche de béton bitumineux poreux de 0,10 m d'épaisseur reposant sur un gravier stabilisé au bitume (Figure 3b).

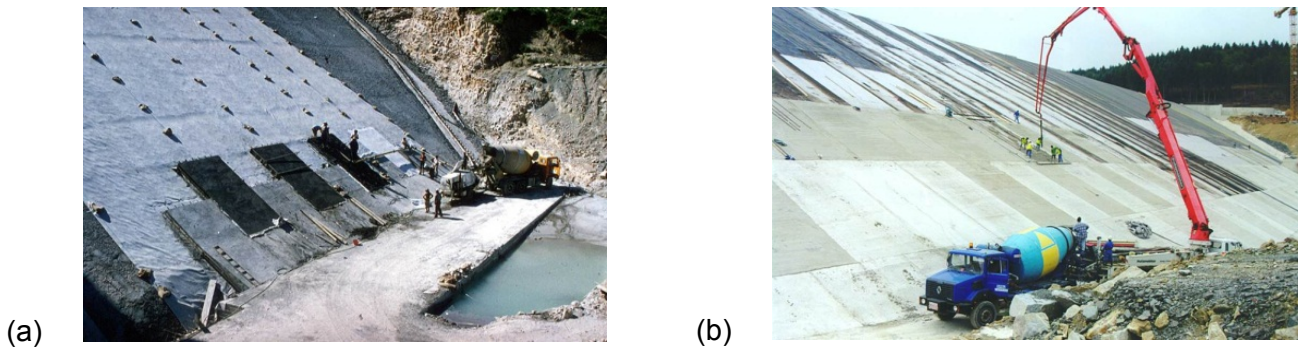


Figure 3. (a) Barrage de Bovilla pendant la mise en place de la protection en béton. (b) Barrage de la Galaube pendant la mise en place de la protection en béton.

3.4.5 Couverture en béton projeté

Lorsque seulement une protection légère est nécessaire, on peut utiliser de 50 à 70 mm de béton projeté renforcé par une géogrille en polypropylène. En cas de déformation du support, le béton projeté peut se fissurer, mais, grâce au renforcement par géogrille, la protection de la géomembrane continue d'être assurée. Il faut interposer un géotextile nontissé aiguilleté entre la géomembrane et le béton projeté. Ce géotextile protège la géomembrane lors de la projection du béton et contre les bords anguleux de béton en cas de fissuration. Le géotextile nontissé doit être connecté à un exutoire pour assurer le drainage entre la géomembrane et le béton projeté et, ainsi, éviter les sous-pressions.

Si le poids du béton projeté ne cause pas de tension exagérée dans la géomembrane, la protection peut être ancrée en crête ; dans le cas contraire, on peut, à des niveaux intermédiaires, supporter le béton projeté par des poutres métalliques ancrées en crête à l'aide de câbles.

Ce type de protection a été utilisé au barrage de Mucone en Italie, 1986, 7 m de haut, 880 m de long. La géomembrane PVC de 1,5 mm est recouverte d'un géotextile nontissé aiguilleté de 500 g/m² recouvert de 60 mm de béton projeté renforcé par une géogrille en polypropylène.

3.4.6 Couverture en béton contenu dans des géocellules ou des géomatelas

Une protection en mortier contenu dans des géocellules (structures géosynthétiques alvéolaires) ou des géomatelas (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.

3.4.7 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 m, 1V:2,5H, la coupe de haut en bas est la suivante :

- 0,5 m d'enrochements 100-300 mm
- 0,2 m de gravier 0-25 mm
- géotextile nontissé aiguilleté (500 g/m²)
- géomembrane PVC 1,2 mm
- géotextile nontissé aiguilleté (500 g/m²)
- 0,2 m de couche drainante en gravier 0-25 mm

Pendant la construction, avant mise en place des enrochements, un glissement s'est produit sur une surface de 1000 m² à l'interface entre la géomembrane et le géotextile sous-jacent (Girard et al., 1990 ; Alonso et al., 1993). Ce glissement sur une pente de 22 degrés était inattendu car les valeurs suivantes de l'angle de frottement à l'interface géotextile-géomembrane avaient été mesurées : 34 degrés avec une boîte de cisaillement (sous contrainte normale élevée) et 28 degrés avec un plan incliné (sous contrainte normale faible, ce qui est plus approprié considérant la faible épaisseur de matériaux au-dessus de l'interface, donc la faible contrainte normale). Des essais effectués après le glissement ont montré que l'angle de frottement à l'interface était réduit de 3 degrés par de l'humidité à l'interface et de 3 degrés également par des vibrations comme celles que peuvent provoquer le rouleau vibrant treuillé depuis la crête utilisé pour le compactage du gravier situé au-dessus de la géomembrane. Ces

différentes valeurs illustrent le fait que les mesures de frottement aux interfaces sont délicates. Enfin, il faut noter que la géomembrane PVC avait sa face supérieure embossée, ce qui lui conférait un angle de frottement à l'interface plus grand d'environ 2 degrés que l'angle de frottement le long de sa face inférieure ; ceci explique pourquoi le glissement a eu lieu sous la géomembrane et non dessus.

Un exemple récent de couverture de géomembrane par couches de sol est le barrage d'Aubert (France) où l'utilisation d'enrochements a été requise tant pour l'aspect esthétique que pour la protection de la géomembrane PVC (Scuero et al., 2011). Un autre exemple est celui de la protection de la géomembrane LLDPE au réservoir de l'Adret des Tuffes, France (Delorme et al., 2009).

3.5 Barrages avec géomembrane interne

3.5.1 Discussion générale

Les avantages et inconvénients des géomembranes situées à l'intérieur des barrages en remblai ont été examinés à la Section 3.2.1 où l'on a vu que les géomembranes en position interne ont généralement plus d'inconvénients que d'avantages. Par conséquent, les barrages avec géomembranes internes ne comptent que pour 10% des barrages avec géomembranes. Des exemples sont donnés ci-dessous.

3.5.2 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 degrés. Une géomembrane inclinée a été utilisée au barrage de Valence d'Albi, France, 16 m de haut, construit en 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 (Girard et al., 1990 ; Alonso et al., 1990 ; Giroud, 1991). 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.

3.5.3 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 1,5 mm.

Un excellent exemple de géomembrane en position interne en forme d'accordéon (Figure 4a) 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 4b). Les panneaux de géomembrane ont été soudés entre eux à plat sur la crête temporaire du remblai à la fin de chaque phase. Cette mise en place alternée est celle recommandée par Giroud (1990, 1991) qui l'avait préconisée pour la surélévation du barrage de Middle Creek, États-Unis, en 1992 avec une géomembrane CSPE (Giroud, 1992).

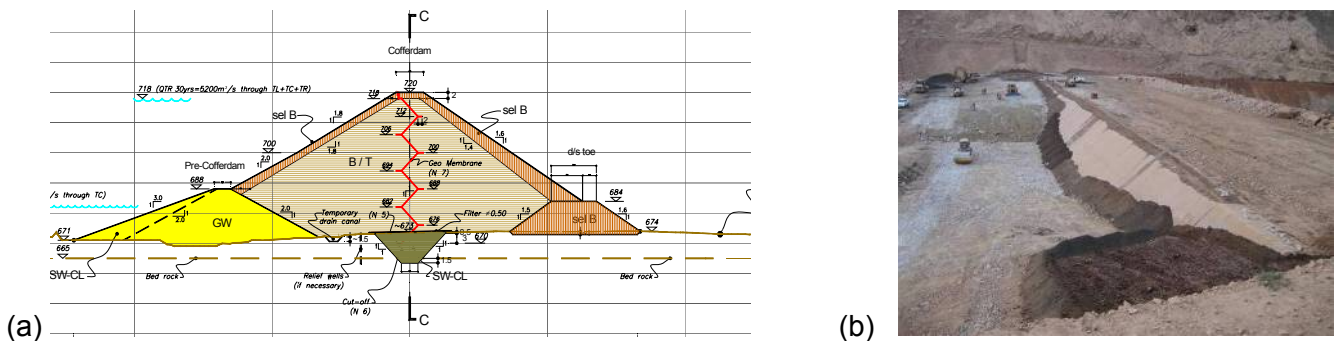


Figure 4. (a) Coupe typique du batardeau Gibe III. (b) Vue du batardeau en construction.

3.6 Réhabilitation de barrages en remblai

3.6.1 Réhabilitation de barrages en terre

Un exemple intéressant de réhabilitation de barrage en remblai est celui du barrage de Golden Camp, barrage en terre de 265 m de long et 30 m de haut, construit en 1954 dans le Colorado (États-Unis) à une altitude de 1985 m. Trois ans après la construction, une fuite importante vida le réservoir. Des

injections réduisirent le débit de fuite, mais, pour des raisons de sécurité, le réservoir fut maintenu à un niveau bas.

En 1983, le barrage fut réhabilité en recouvrant la pente amont entière (d'une hauteur de 20 m et inclinée à 1V:3,5H) d'une géomembrane CSPE de 1,5 mm d'épaisseur. Cette géomembrane, ancrée en crête et à la périphérie dans une simple tranchée, fut laissée exposée en dépit de sa grande surface. Des orifices dans la géomembrane, près de la crête, contribuent à assurer sa stabilité en cas de vent en générant, sous la géomembrane, une dépression qui s'oppose au soulèvement causé par le vent.

Au barrage de Golden Camp, la solution d'étanchéité par géomembrane a été préférée aux solutions suivantes : (1) addition d'une zone aval compactée avec drain de pied ; (2) installation de tuyaux drainants verticaux pour la dissipation des pressions interstitielles ; (3) addition d'une couche d'argile sur la pente amont. La réhabilitation a été un succès et les fuites pratiquement éliminées.

3.6.2 Réhabilitation des barrages en enrochements avec masque en béton ou béton bitumineux

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. Comme cela a été expliqué à la Section 3.2.3, 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 étanches ne se pratique plus (mais on peut évidemment coller des géomembranes sur des bétons ou des bétons bitumineux poreux, comme cela a été mentionné à la Section 2.2). On utilise des fixations mécaniques en veillant à avoir un matériau drainant entre la géomembrane et le béton ou le béton bitumineux étanches.

Pour la réhabilitation de barrages en enrochements avec masque amont en béton ou béton bitumineux, on pourrait clouer la géomembrane sur le masque, comme cela a été fait pour la réparation du barrage en béton de Heimbach en Allemagne (voir Section 4.1.2). Mais, pour la réhabilitation de barrages en enrochements avec masque amont en béton ou béton bitumineux, on a essentiellement utilisé jusqu'à présent la méthode de fixation mécanique par profilés, qui est la plus fréquemment utilisée pour la réhabilitation des barrages en béton (et qui sera décrite à la Section 4.2.4).

La réhabilitation peut se faire soit uniquement au-dessus de joints défailants, comme au barrage de Strawberry, soit sur toute la surface du masque, comme dans les deux exemples ci-dessous.

La réhabilitation du barrage en enrochements avec masque en béton de Salt Springs (Californie) s'est faite en deux années successives, avec évaluation du succès de la première phase avant de commencer la deuxième phase. Le barrage de Salt Springs, 383 m de longueur en crête, 101 m de haut, construit de 1928 à 1931, est le premier barrage en enrochements avec masque en béton qui ait dépassé 100 m de haut. La mise en place des enrochements fut inadéquate : enrochements mal lavés et ségrégation des différentes dimensions d'enrochements, ce qui se traduit par des tassements importants qui se sont produits pendant de nombreuses années (Larson et al., 2005).

La pente amont est en moyenne de 1V:1,3H. Le masque amont est composé de dalles de 18 m x 18 m et d'épaisseur 0,3 m au sommet de la pente amont et 0,9 m en bas de la pente. La surface totale du masque amont est d'environ 40 000 m². Le tassement des enrochements a causé une intense fissuration du masque en béton. Des réparations du masque ont été faites au cours de 22 années différentes entre 1938 et 2003. Le défaut fondamental de ces réparations était d'utiliser du béton, qui est un matériau rigide, alors que le masque continuait de se déformer. En dépit de ces réparations, le débit de fuite était en 2003 encore de 3000 m³/h soit 75 litres/h/m², après avoir été bien plus élevé par le passé. On pouvait donc s'attendre à ce que le débit de fuite augmente à nouveau.

Ce barrage servant à produire de l'électricité et étant très rentable, il n'était pas question de vider complètement le réservoir pour réparer. Le propriétaire a déterminé qu'il suffisait de faire une réparation telle que le débit de fuite soit définitivement maintenu en dessous de 3000 m³/h. Une étude a montré que, pour atteindre ce but, il suffisait de revêtir d'une géomembrane la partie du masque amont se trouvant entre 15 m et 61 m de dénivelée mesurée à partir de la crête du barrage. Cette zone avait une longueur mesurée suivant la pente de 75 m et une largeur de 360 m au niveau 15 m au-dessous de la crête et 160 m au niveau 61 m au-dessous de la crête, soit une surface de 20 000 m². Ainsi, il fut possible de maintenir environ 40 m d'eau dans le réservoir

La réhabilitation se fit avec une géomembrane composite constituée de PVC de 2,5 mm d'épaisseur thermolié à un géotextile nontissé aiguilleté de 500 g/m². Du fait du très mauvais état de surface du béton (Figure 5a), un géotextile nontissé aiguilleté de 2000 g/m² a été placé sur le masque en béton pour servir de support à la géomembrane. La géomembrane a été fixée à l'aide du système de profilés typiquement utilisé pour la réhabilitation des barrages en béton et qui sera décrit à la Section 4.2.4.

Au cours de la première phase de travaux (en février-mars 2004), la géomembrane fut installée dans une zone-test de 2000 m² située à environ 50 m de dénivelée en dessous de la crête. Le réservoir fut ensuite rempli pendant l'été 2004. Après avoir vidé le réservoir en 2005 jusqu'au niveau de la zone-test, il fut possible de constater que la géomembrane avait parfaitement résisté à la pression d'environ 45 m d'eau. La géomembrane était très déformée, ayant épousé les irrégularités du support, mais elle était en parfaite condition (Figure 5b). La viabilité de la solution ayant été démontrée, il fut possible de procéder à la seconde phase qui consistait à placer la géomembrane sur l'ensemble de la zone de 20 000 m² à étancher (la zone-test étant comprise dans les 20 000 m²), ce qui fut fait en 2005.

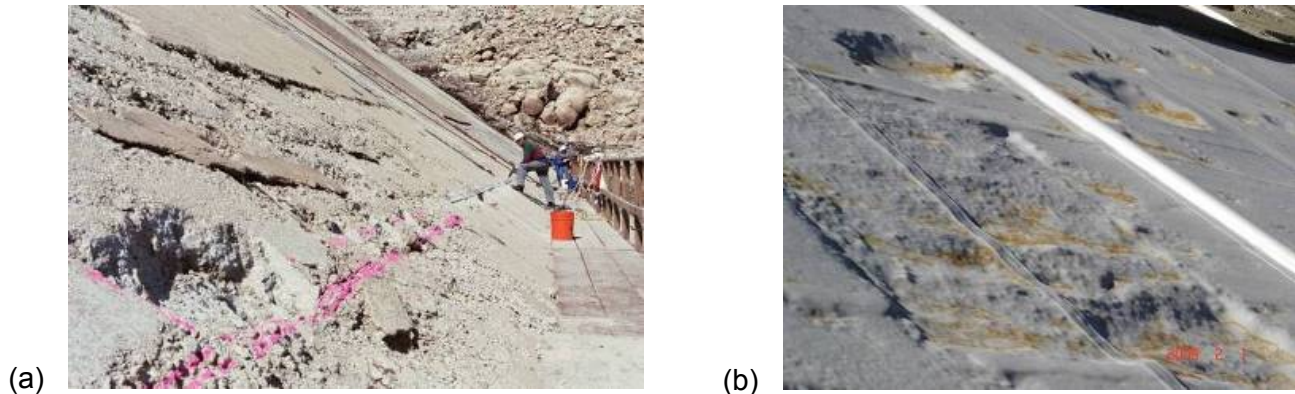


Figure 5. (a) État de surface du béton du masque amont du barrage en enrochements de Salt Springs. (b) Aspect de la géomembrane composite après une saison sous environ 45 m d'eau.

Après achèvement de l'installation de la géomembrane dans la zone de 20 000m², le réservoir a été à nouveau rempli. Le débit de fuite était alors de 1200 m³/h soit 30 litres/h/m², ce qui est nettement inférieur au débit de fuite à atteindre. Il faut noter qu'un tel débit de fuite est encore environ 50 fois supérieur à celui que l'on peut espérer avec une géomembrane qui couvrirait tout le masque amont, à supposer que les fuites ne contournent pas le masque.

La même méthode a été utilisée au barrage de Moravka, un barrage en terre de 39 m de haut en Tchéquie. Ce barrage a un masque amont en béton bitumineux. Ce matériau étant moins rigide que le béton, il fallut s'assurer par des essais d'arrachement que les ancrages mécaniques ou chimiques utilisés pour ancrer les profils au béton bitumineux étaient suffisamment résistants. Le barrage de Moravka avait, dans le passé été réparé en plaçant une nouvelle couche de béton bitumineux, ce qui requiert de scarifier le béton bitumineux existant, une opération fastidieuse. Mais cette réparation n'avait pas diminué les fuites. La réhabilitation par géomembrane est plus simple et plus efficace.

3.7 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 et 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 1000 m² de géomembrane donne un débit de fuite de 0,1 litre/h/m² pour une hauteur d'eau de 10 m et 0,2 litre/h/m² pour 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.

4 Barrages en béton et maçonnerie

4.1 Discussion générale

4.1.1 Importance de l'imperméabilité dans les barrages en béton et maçonnerie

Il est important de minimiser la perméabilité des barrages en béton pour les raisons suivantes : (1) 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 ; (2) pour minimiser le risque de détérioration du béton, ce

qui est, en général, la raison principale ; (3) pour minimiser les sous-pressions qui tendent à soulever le barrage ; (4) 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.

4.1.2 Utilisation de géomembranes dans les barrages en béton et maçonnerie

Comme cela a été indiqué à la Section 2.3.1, 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. Cependant, il semble que, jusqu'à présent, on n'ait utilisé des géomembranes que dans trois barrages nouveaux et uniquement pour l'étanchéité du pied amont (à la jonction entre la face amont et la plinthe). Par conséquent, le reste de la Section 4 sera consacré à la réhabilitation ou réparation de barrages en béton existants.

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 I. On note dans ce tableau que les géomembranes PEHD et bitumineuses ne sont pas utilisées dans cette application.

Tableau I. Géomembranes utilisées dans les barrages en béton.

(Note : CPE = polyéthylène chloré. Les autres acronymes sont définis à la Section 3.1.)

Type de barrage	Géomembrane	PVC	LLDPE	CSPE	CPE
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

Comme le montre le Tableau I, 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, un barrage voûte en Autriche (200 m) et le barrage d'Alpe Gera en Italie (174 m). 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. Cependant, il y a quelques exemples d'installation sous le niveau de l'eau du réservoir (voir Section 2.3.3).

Un exemple original est celui du barrage de Heimbach en Allemagne, un barrage poids de 12 m de haut et 105 m de longueur en crête, construit en 1937. Une surface de 500 m² de la face amont verticale a été réparée en 1974 avec une géomembrane PVC de 3 mm clouée sur le béton avec un clou par m².

4.2 La technologie la plus fréquente

4.2.1 Introduction

La même technologie a été utilisée dans près de 90% des réhabilitations de barrages en béton et maçonnerie. Cette technologie, qui est présentée dans les sections suivantes, 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.

4.2.2 La géomembrane utilisée

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 2.1 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 remplit les fonctions suivantes : (1) il renforce la géomembrane, réduisant ainsi le fluage de la géomembrane lorsqu'elle est installée verticalement ; (2) il protège la géomembrane des irrégularités du support ; (3) il contribue au drainage derrière la géomembrane.

4.2.3 Mise en place de la géomembrane

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 décrits à la Section 4.2.4, qui sont ancrés au béton formant des lignes verticales parallèles (Figure 6a). Cependant, la mise en place de la géomembrane se fait horizontalement si la géométrie du barrage l'exige. C'est le cas des barrages à voûtes multiples. La mise en place de la géomembrane est alors délicate et demande une main d'œuvre expérimentée et une géomembrane capable de se déformer pour s'adapter à la surface du barrage. Par ailleurs, certaines contraintes d'exploitation peuvent amener à choisir une mise en place horizontale ; c'est le cas de certaines stations de pompage.

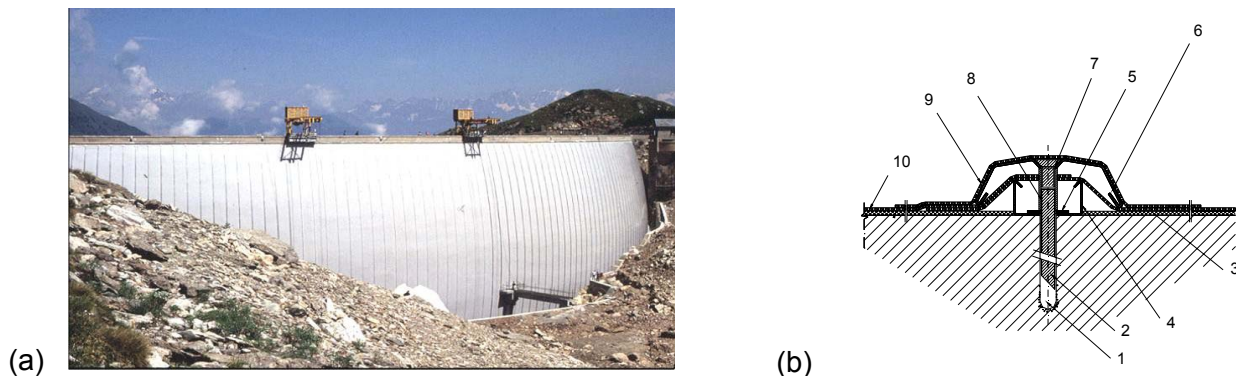


Figure 6. (a) Face amont d'un barrage réhabilité montrant les lignes verticales parallèles formées par les fixations mécaniques. (b) Coupe du système breveté de fixation mécanique. Légende : 1. Ancrage chimique. 2. Tige filetée en acier. 3. Géoespaceur. 4. Profilé interne. 5. Rondelle. 6. Profilé externe. 7. Vis. 8. Coupleur. 9. Bande géomembrane de couverture. 10. Géomembrane composite.

4.2.4 Fixation de la géomembrane

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 (Cazzuffi & Sembenelli, 1994). 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 6b). La géométrie des deux profilés est telle que, lorsqu'ils sont connectés, ils soumettent la géomembrane à une tension. Cette tension a les avantages suivants : (1) elle réduit l'affaissement de la géomembrane dû à la gravité ; (2) elle réduit les mouvements et déformations de la géomembrane en cas de vent et de vagues ; (3) elle 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 (voir Section 4.2.6).

L'espacement entre profilés est dicté par les charges (vitesse du vent, masse surfacique et hauteur de géomembrane verticale) et par la largeur des lés de géomembrane. Avec des lés de 2,1 m de large, l'espacement entre profilés, centre à centre, est typiquement de 1,8 m, 3,7 m or 5,7 m.

4.2.5 Joint périphérique

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.

4.2.6 Drainage

Il y a toujours un drainage entre la face du barrage et la géomembrane. Ce drainage comprend: (1) le géotextile qui fait partie de la géomembrane composite ; (2) un espace vide entre la géomembrane et la face du barrage (dont l'épaisseur dépend de la pression exercée par l'eau) ; (3) un géotextile nontissé épais utilisé, dans certains cas, pour protéger la géomembrane et qui contribue au drainage; (4) lorsqu'une grande capacité de drainage est requise, une couche drainage géosynthétique, typiquement un géospaceur ; (5) les conduits formés par les profilés (voir Section 4.2.4) ; (6) un ou plusieurs tuyaux collecteurs à la base du barrage ; (7) des tuyaux d'évacuation vers l'aval ou vers une galerie.

Le système de drainage remplit trois fonctions : (1) il empêche l'accumulation, entre la géomembrane et le barrage, de liquide qui soulèverait la géomembrane en cas de vidange rapide du réservoir (voir Section 3.2.3) ; (2) il permet de mesurer la performance de la géomembrane (et, pour cela, le système de drainage peut être divisé en compartiments) ; (3) il draine l'eau qui, au cours des années, s'est accumulée dans le barrage. Cette dernière fonction est discutée ci-dessous.

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 : (1) réduction de la pression interstitielle dans le barrage et, par conséquent, réduction du risque de soulèvement du barrage ; (2) suppression de l'entraînement de particules fines du béton par l'eau ; (3) ralentissement de la réaction alcali-granulats (Scuero & Vaschetti, 2008).

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

4.3.1 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 : (1) décapage à l'eau sous haute pression pour enlever les morceaux de béton instables et les corps étrangers ; (2) remplissage des cavités profondes par du mortier, si nécessaire ; (3) mise en place d'un géotextile nontissé aiguilleté épais ou autre géosynthétique, si nécessaire, en cas de surface très irrégulière.

4.3.2 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 2000 g/m² a été placé sur la maçonnerie extrêmement irrégulière avant l'installation d'une géomembrane composite constituée de PVC thermolié à un géotextile (Figure 7). 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 avant réhabilitation est devenu 0,1 litre/m²/h après réhabilitation.

4.3.3 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 : (1) soit remplacer le béton projeté par une nouvelle couche de béton projeté ; soit (2) placer sur le béton ou la maçonnerie du barrage un géotextile épais pour protéger la géomembrane des irrégularités du support.

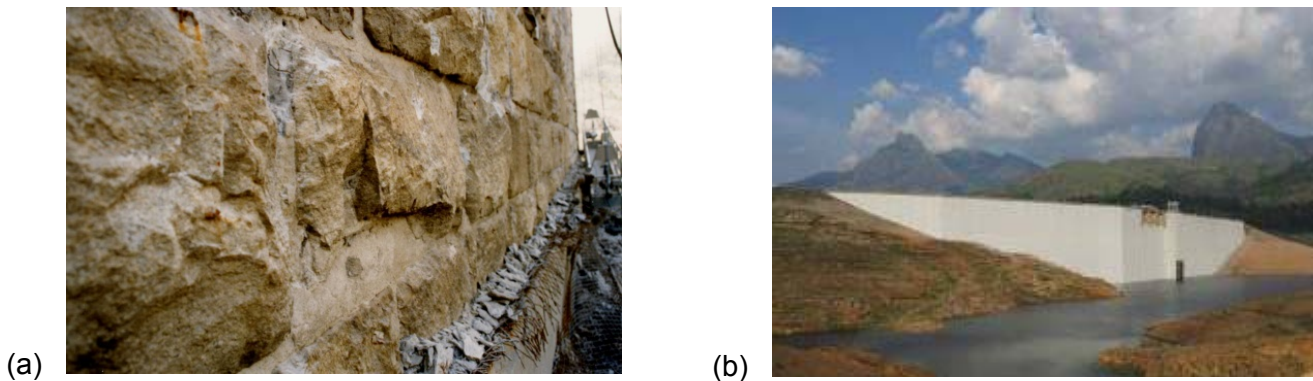


Figure 7. (a) État de surface du barrage de Kadamparai avant réhabilitation. (b) Le barrage après réhabilitation.

5 Barrages en béton compacté au rouleau

5.1 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 : (1) 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 30 cm, donc elle réduit le risque de soulèvement (Scuero & Vaschetti, 2005) ; (2) 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) ; (3) 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).

5.2 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, voir Section 2.3.2) consiste à utiliser des panneaux préfabriqués en béton comme coffrage côté amont pour la mise en œuvre du béton compacté au rouleau (Figure 8a). 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.

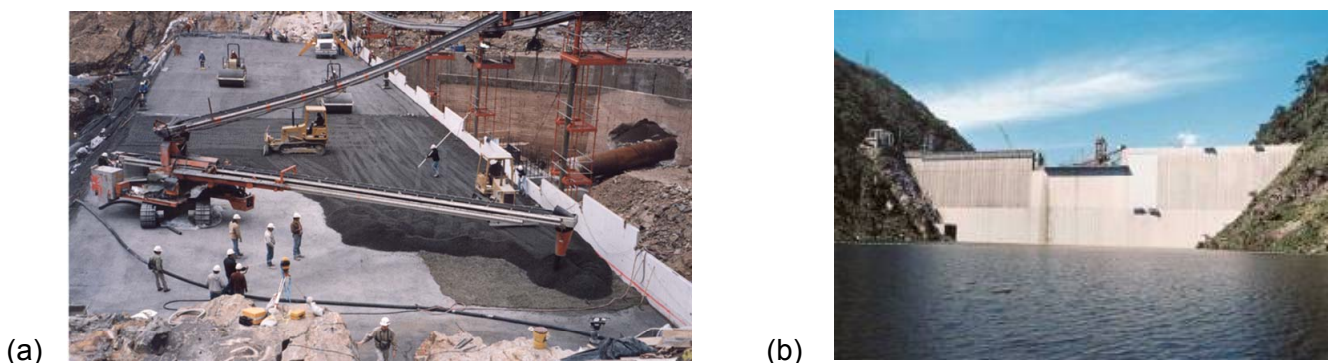


Figure 8. (a) Compactage du béton derrière des panneaux préfabriqués. (b) Réservoir partiellement rempli avant la fin des travaux au barrage de Miel.

- 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 décrite à la Section 4.2. 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 (Figure 8b).

5.3 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 II. 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 en béton compacté au rouleau construits sans géomembrane. Le tableau montre que les deux méthodes décrites à la Section 5.2 sont utilisées en quantités à peu près égales, et que, dans presque tous les cas, une géomembrane PVC est utilisée.

Tableau II. Géomembranes utilisées dans les barrages en béton compacté au rouleau
(Note : Les acronymes sont définis à la Section 3.1.)

Position de la géomembrane	Exposition	PVC	LLDPE	PEHD
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

6 Géomembranes utilisées dans les barrages

6.1 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.* Du fait de la grande hauteur des barrages, les géomembranes, en particulier en cours d'installation, sont soumises à des contraintes de traction dues à la gravité, d'où le risque de fluage.
- *Pression hydrostatique.* Du fait de la grande hauteur des barrages, la pression hydrostatique est généralement élevée, ce qui impose à la géomembrane de ne pas être endommagée par poinçonnement (de préférence en se déformant plutôt qu'en résistant) et de s'adapter aux déplacements différentiels qui se produisent notamment aux raccordements entre la géomembrane et les ouvrages annexes ou périphériques.
- *Support rigide.* Les géomembranes utilisées dans les barrages sont souvent supportées par un matériau rigide. Les matériaux rigides ont tendance à se fissurer. Lorsque cela se produit, il faut donc que les géomembranes soient capables de résister à des pressions hydrostatiques élevées tout en étant situées sur des fissures.
- *Grande étendue du réservoir.* Du fait de la grande étendue du réservoir, la géomembrane (si elle est exposée) est soumise à de grosses vagues.
- *Alimentation du réservoir par un cours d'eau.* Lorsque le réservoir est alimenté par un cours d'eau, la géomembrane (si elle est exposée) est soumise à l'action de débris flottants.
- *Haute altitude.* Les barrages sont souvent situés à haute altitude. Il en résulte que la géomembrane (si elle est exposée) est soumise à un rayonnement ultraviolet intensif, à de basses températures et à l'action de la glace.
- *Absence de produits chimiques.* Les géomembranes utilisées dans les barrages ne sont généralement pas soumises à l'action de produits chimiques. Par conséquent, certains critères fréquemment utilisés pour la sélection des géomembranes dans le domaine du génie de l'environnement (stockage de déchets ou produits industriels) sont sans rapport avec la sélection des géomembranes pour leur utilisation dans les barrages.

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 & Soderman, 1995 ; Giroud, 2005).

6.2 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. Une discussion de ces données dépasserait le cadre de cet article.

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 et 1996) 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 50 ans (Hsuan et al., 2008). Il est important 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 intéressant de remarquer que le béton des barrages réhabilités à l'aide de ces géomembranes s'était détérioré au cours d'une période de 15 à 60 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 50) dans les conditions d'utilisation des barrages.

6.3 Types de géomembranes utilisées dans les barrages

Compte tenu des considérations présentées à la Section 6.1 sur la sélection des géomembranes et des informations sur leur durabilité présentées à la Section 6.2, 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 des géomembranes composites PVC thermolié à un géotextile nontissé aiguilleté. Ces géomembranes 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. Il faut cependant noter que les données de la CIGB comprennent de nombreux barrages avec géomembranes polymériques très minces, beaucoup d'entre eux étant de petits barrages. Par conséquent, dans les barrages de grande hauteur, la proportion de géomembranes bitumineuses est supérieure à 9%. 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 en grande majorité des géomembranes en polyéthylène du fait de leur résistance chimique.

7 Conclusions

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

8 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.

9 Références bibliographiques

- Alonso E., Degoutte G., Girard H. (1990). Results of seventeen years of using geomembranes in dams and basins. *Proceedings of the 4th International conference on geotextiles, geomembranes and related products*, Vol. 2, The Hague, The Netherlands, pp. 437-442.
- Alonso E., Degoutte G., Girard H. (1993). Réalisation et comportement d'ouvrages hydrauliques munis d'une géomembrane. *Comptes Rendus de Rencontres 93*, Volume 2, pp. 285-294.
- Cancelli A., Cazzuffi D. (1994). Environmental aspects of geosynthetic applications in landfills and dams. *Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Keynote Lecture, Singapore, Vol. 4, , pp. 1299-1337.
- Cazzuffi D. (1987). The use of geomembranes in Italian dams, *International Water Power & Dam Construction*, Vol. 39, No. 3, pp. 17-21.
- Cazzuffi D. (1993). Étanchéité par géomembrane pour la réhabilitation de barrages en béton en Italie : le barrage du Lago Nero. *Comptes Rendus de Rencontres 93*, Volume 2, pp. 325-334.
- Cazzuffi D. (1996). Réhabilitation de barrages en maçonnerie ou en béton à l'aide de géomembranes: l'expérience italienne. *CFGB - CFG, Les Géotextiles et le Géomembranes dans les barrages*, Colloque Technique, Paris, France, pp. 14.1-14.12.
- Cazzuffi D., Giroud J.P., Scuero A., Vaschetti G. (2010). Geosynthetic barriers systems for dams. Keynote Lecture, *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics* , Guaruja, Brésil, Vol. 1, pp. 115-163.
- Cazzuffi D., Sembenelli P. (1994). A geocomposite-adhesive system for rehabilitating an upstream dam face. *Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol. 2, Singapore, pp. 625-628.
- CIGB. Commission Internationale des Grands Barrages (2010). *Bulletin 135. Geomembrane sealing systems for dams - Design principles and return of experience*. Paris, France.
- Delorme F., Lochu A., Kraemer P., Scuero A., Vaschetti G., Prost S., Recalcati P. (2009). Retenue d'altitude de l'Adret des Tuffes : conception et mise en œuvre d'un double dispositif d'étanchéité par géomembrane intégralement en géosynthétiques. *Actes, Rencontres Géosynthétiques 2009*, Nantes, France, pp. 233-244.
- Fayoux D., Potié G. (2006). Geomembrane in Tenerife and La Palma Islands, Canary Islands. *Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohama, Japan, Vol. 2, pp. 603-606.
- Gautier J.L., Lino L., Carlier D. (2002). A record height in dam waterproofing with bituminous géomembrane: La Galaube Dam on Alzeau river. *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Balkema, Rotterdam, Vol.3, pp 975-978.
- Girard H., Fischer S., Alonso E. (1990). Problems of friction posed by the use of geomembranes on dam slopes - Examples and measurements. *Geotextiles & Geomembranes*, Vol. 9, No. 2, pp. 129-143.
- Giroud J.P. (1973). L'étanchéité des retenues d'eau par feuilles déroulées. *Annales de l'ITBTP*, 312, TP 161, Décembre, pp. 94-112.
- Giroud J.P. (1983). *Barrage de Codole. Notes en cours de conception et construction*, Dossiers d'archives.
- Giroud J.P. (1990). Functions and applications of geosynthetics in dams. *Water Power and Dam Construction*, Vol. 42, No. 6, June 1990, pp. 16-23.
- Giroud J.P. (1991). *Embankment Dams - Geomembranes*, U.S. Bureau of Reclamation Design Standards, No. 13, Chapter 20, 302 pages.
- Giroud J.P. (1992). Geosynthetics in dams: Two decades of experience. *GFR*, Vol. 10, No. 5, July-August 1992, pp. 6-9, and Vol. 10, No. 6, September-October 1992, pp. 22-28.
- Giroud J.P. (1997). Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to géomembrane defects. *Geosynthetics International*, Special Issue on Liquid Migration Control Using Geosynthetic Liner Systems, Vol. 4, Nos. 3-4, pp. 335-348.
- Giroud J.P. (2005). Quantification of geosynthetics behavior", *Geosynthetics International*, Special Issue on Giroud Lectures, Vol. 12, No. 1, pp. 2-27.
- Giroud J.P. (2009). An explicit equation for strain in geomembrane uplifted by wind. *Geosynthetics International*, Vol. 16, No. 6, pp. 500-502.
- Giroud J.P., Bonaparte R. (1989a). Leakage through liners constructed with geomembranes, Part I: Géomembrane Liners", *Geotextiles & Geomembranes*, Vol. 8, No. 1, pp. 27-67.
- Giroud J.P., Bonaparte R. (1989b). Leakage through liners constructed with geomembranes, Part II: Composite Liners", *Geotextiles & Geomembranes*, Vol. 8, No. 2, pp. 71-111.

- Giroud J.P., Bonaparte R. (1993). *Geosynthetics in dam rehabilitation*. Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, Anderson, L.A., Editor, ASCE Geotechnical Special Publication 35, Proceedings of a Conference held in Raleigh, N.C., USA., April, pp. 1043-1074.
- Giroud J.P., Gleason M.H., Zornberg J.G. (1999). Design of geomembrane anchorage against wind action. *Geosynthetics International*, Vol. 6, No. 6, pp. 481-507.
- Giroud J.P., Pelte T., Bathurst R.J. (1995). Uplift of geomembranes by wind. *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 6, pp. 897-951. (Errata, 1997, Vol. 4, No. 2, pp. 187-207, and 1999, Vol. 6, No. 6, pp. 521-522.)
- Giroud J.P., Soderman K.L. (1995). Comparison of geomembranes subjected to differential settlement. *Geosynthetics International*, Special Issue on Design of Geomembrane Applications, Vol. 2, No. 6, pp. 953-969.
- Giroud J.P., Wallace R.B., Castro C.J. (2006). Improved methodology for geomembrane wind uplift design. *Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohama, Japan, Vol. 1, pp. 225-230.
- Hsuan Y.G., Schroeder H.F., Rowe K., Mueller W., Greenwood J., Cazzuffi D., Koerner R.M. (2008). Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics. Keynote Lecture, *Proceedings of EuroGeo 5 - Fourth European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, CD Rom.
- Johnson D. (2010). Personal communication to J.P. Giroud.
- Larson E., Kelly R., Dreese T., Wilkes, J. (2005). Repairing concrete face rockfill dams in cold climates: the case of Salt Springs. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 12, Issue 4, pp. 82-86.
- Pietrangeli G., Pietrangeli A., Scuero A., Vaschetti G. (2009). Gibe III: a zigzag geomembrane core for a 50 m high rockfill cofferdam in Ethiopia. *Proceedings of 1st International Symposium on Rockfill Dams*, pp. 93-99.
- Scuero A. M., Vaschetti G. (2005). Tackling uncertainties with géomembranes. *Proceedings, ICOLD 73rd Annual Meeting*, Tehran, Iran, CD Rom.
- Scuero A. M., Vaschetti G., Wilkes J. A. (2005). Construction of new exposed waterstops, and their application to repair of Concrete Face Rockfill Dams. *Proceedings, Concrete Face Rockfill Dam & the 20th Anniversary of China's Concrete Face Rockfill Dams Construction*, Yichang, China, pp. 100-107.
- Scuero A., Vaschetti G. (2006). The new ICOLD Bulletin on impervious geomembranes for dams. *Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohama, Japan, pp. 627-630.
- Scuero A. M., Vaschetti G. (2008). Geosynthetic waterproofing geomembranes control seepage in dams and improve long time behaviour. *Proceedings, of the 1st International Conference on Long Time Effects and Seepage Behavior of Dams*, Nanjing, China.
- Scuero A.M., Vaschetti G. (2009). Use of geomembranes for new construction and rehabilitation of hydraulic structures. Keynote lecture, *Workshop on Advanced Methods and Materials for Dam Construction*, Skopje, Firrom.
- Scuero A., Vaschetti G., Bacchelli M. (2011). Installation d'une géomembrane PVC au barrage d'Aubert. *Actes, Rencontres Géosynthétiques 2011*.
- Sembenelli P., Sembenelli G., Scuero A. M. (1998). Geosynthetic system for the facing of Bovilla Dam. *Proceedings, Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, Industrial Fabrics Association International, Roseville, Minnesota, Vol. II, pp. 1099-1106.
- Tisserand C. (1993). L'étanchéité par géomembrane du barrage de Figari. *Actes, Rencontres 93*, Vol. 2, pp. 295-304.
- Tisserand C., Breul B., Herment R. (1997). Le barrage d'Ortolo et ses prédécesseurs : Retour d'expérience. *Actes, Rencontres 97*, Volume 1, pp. 135-140.
- Touze-Foltz N., Giroud J.P. (2003). Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembranes defects. *Geosynthetics International*, Vol. 10, No. 6, pp. 215-233.
- Zornberg J.G., Giroud J.P. (1997). Uplift of geomembranes by wind. Extension of equations. *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 2, pp.187-207. (Errata: 1999, Vol. 6, No. 6, pp. 521-522).