

COMPORTEMENT À LONG TERME DE GÉOMEMBRANES EXPOSÉES EN RÉHABILITATION DU PAREMENT AMONT DE BARRAGES EN ITALIE

LONG-TIME BEHAVIOUR OF EXPOSED GEOMEMBRANES IN REHABILITATION OF THE UPSTREAM FACE OF DAMS IN ITALY

Daniele CAZZUFFI
CESI SpA, Milan, Italie

RÉSUMÉ - Dans plusieurs applications sur barrages en Italie, les géomembranes ont été laissées exposées sur le parement amont, sans protection externe. Afin de vérifier la performance du système d'étanchéité au fil du temps, plusieurs échantillons de géocomposites en service depuis plusieurs années ont été prélevés sur un grand nombre de barrages. Ces échantillons ont été soumis à des essais physiques et mécaniques, afin d'observer l'évolution de leurs propriétés au fil des ans. Dans beaucoup de cas, en particulier lorsque les résultats des essais sur les échantillons vierges étaient disponibles, il a été possible d'évaluer la durée de vie résiduelle des géocomposites exposés sur différents types de barrages.

Mots-clés : géomembrane, géocomposite, comportement à longue terme, barrage, parement amont.

ABSTRACT - In some applications on Italian dams, the geomembranes were left exposed without external protection. To verify the performance of the waterproofing system over time, several geocomposite samples in service for many years have been taken from a considerable number of dams. These samples have then been tested for physical and mechanical properties, in order to observe the evolution of their properties over the years. In many cases, particularly when the results of tests on virgin samples were available, it has been possible to evaluate the residual life of exposed geocomposites on the different types of dams.

Keywords : geomembrane, geocomposite, long-time behaviour, dam, upstream face.

1. Introduction

L'une des problématiques les plus importantes lors de la réhabilitation des barrages en béton et en maçonnerie avec des géomembranes exposées est l'évaluation de la durée de vie résiduelle de la géomembrane. La prédiction du moment où il serait nécessaire de remplacer la géomembrane joue un rôle très important d'un point de vue managérial.

Les deux objectifs principaux dans la réhabilitation des barrages à l'aide de géomembranes sont :

- réduire la dégradation du parement amont du barrage qui peut conduire à une augmentation des fuites d'eau ;
- prévenir les problèmes de stabilité du barrage qui peuvent avoir pour l'origine l'infiltration d'eau dans le barrage.

Mais, si les effets de la détérioration physique d'un barrage sont bien connus, ou du moins compréhensibles, l'origine et le contrôle des causes de ce phénomène sont plus difficiles, d'autant plus si l'évaluation veut être quantitative plutôt que qualitative (Cazzuffi, 2013).

Les facteurs responsables de la détérioration des conditions d'un barrage sont d'une part les caractéristiques intrinsèques du barrage (matériel, qualité, géométrie, etc.) et d'autre part des éléments spécifiques au site qui sont plus difficiles à gérer, surtout pendant la phase de conception (agents environnementaux, biologiques et/ou facteurs chimiques, etc.).

S'il est difficile de comprendre parfaitement les causes de la détérioration d'un barrage, il est également difficile de connaître les obstacles liés à la prédiction du comportement d'une géomembrane au fil du temps : à cause de ses caractéristiques et de son utilisation, la géomembrane doit être testée dans les mêmes conditions que son environnement d'application, à savoir sous cycles combinés de mouillage et séchage, de changements de température, d'exposition aux rayons UV, etc.

Dans les dernières années, deux philosophies différentes ont émergé afin de recueillir des données expérimentales sur le comportement des géomembranes : (a) reproduire en laboratoire les conditions d'utilisation ou (b) prélever des échantillons de géomembranes déjà installées, après différentes

périodes d'utilisation. Dans tous les cas les géomembranes doivent être soumises à des essais spécifiques de laboratoire, afin de déterminer les variations de leurs propriétés avec le temps.

Suivant la deuxième des deux philosophies mentionnées ci-dessus, cet article analyse le comportement de géomembranes installées sur sept barrages italiens, montrant les résultats récents des essais expérimentaux effectués dans les Laboratoires Géosynthétiques de CESI à Milan et à Piacenza, en Italie, sur des échantillons prélevés directement sur le site.

2. Barrages et géomembranes étudiées

2.1. Les barrages

L'analyse du comportement à long terme des géomembranes présentés dans ce document a été menée en étudiant les performances de plusieurs échantillons de géomembranes prélevées sur le parement amont de sept barrages, en béton ou en maçonnerie, situés dans les Alpes en Italie (Cazzuffi, 1996 ; Cazzuffi, 1998 ; Scuero et Vaschetti, 1996).

La localisation des barrages considérés est présentée sur la figure 1 et leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.



Figure 1. Carte de localisation des barrages considérés dans le document.

Tableau 1. Principales caractéristiques des barrages

Barrage	Type	Hauteur [m]	Année de construction
Piano Barbellino (Fig. 5)	Béton	69,00	1931
Lago Nero (Fig. 2)	Béton	45,50	1929
Camposecco	Maçonnerie	27,00	1930
Ceresole Reale	Béton	52,00	1931
Laghi Gemelli	Béton	36,00	1932
Cignana (Fig. 4)	Béton	58,30	1928
Scais (Fig. 3)	Béton	64,70	1939

Ces barrages sont caractérisés par plusieurs éléments communs, de sorte qu'il est possible de faire quelques considérations communes à tous. Premièrement, tous ont été construits au début du siècle dernier (vers 1930) à des fins hydroélectriques et, en raison des potentialités technologiques de l'époque ou de leur âge, presque centenaire, la perte de leur niveau d'étanchéité à l'eau est parfaitement raisonnable. Deuxièmement, tous ces barrages sont situés dans les Alpes en Italie, entre 1500 et 2500 m d'altitude, dans un environnement très particulier. Les températures et les précipitations sont typiques d'un climat alpin, avec des hivers très froids et des étés frais et pluvieux. La température de l'air varie entre -10°C et -15°C en hiver, avec des pics négatifs de -20°C à -25°C, et entre + 15°C et + 25°C en été.

À cause de l'altitude, les radiations solaires sont très importantes, ce qui provoque des températures très élevées des roches et des barrages. Enfin, il est important de souligner que ces zones sont caractérisées par un climat très variable, responsable de changements brusques de température, avec de forts pics de chaleur qui jouent un rôle important dans la durabilité du barrage.

2.2. Réhabilitation des parements amont des barrages : besoins et méthodes

L'exposition continue des barrages aux agents atmosphériques et environnementaux entraîne au fil des années une détérioration notable du parement amont et une augmentation des fuites par rapport aux valeurs initiales.

Afin de ralentir cette tendance négative, toutes les méthodes ont été essayées : injections de coulis ou de résine, application de béton projeté, panneaux métalliques, etc. se sont avérées des bonnes solutions mais seulement à court terme, à cause du constant et fréquent entretien qu'ils exigent, et de la nécessité de réparations fréquentes. Les résultats n'ont donc pas été satisfaisants et les coûts se sont avérés insoutenables dans la perspective d'une utilisation durable des barrages.

Entre 1980 et 2000, tous les parements amont des sept barrages considérés ont été réhabilités avec une méthode différente, à savoir par l'application d'un système de géomembrane exposée, installée sur le parement amont afin d'en rétablir l'étanchéité initiale. L'utilisation de géomembranes polymériques, qui n'étaient pas disponibles à l'époque où les barrages ont été construits, s'est avérée être une option très efficace, de grande durabilité et peu onéreuse.



Figure 2. Lago Nero.



Figure 3. Scais.

En général, la barrière à l'eau peut être une géomembrane simple ou un géocomposite ; dans la plupart des cas reportés dans le récent bulletin CIGB (CIGB-ICOLD, 2010), la géomembrane est assemblée avec un géotextile au-dessous d'elle. Étant donné que, dans tous les cas présentés ici, la géomembrane est couplée avec un géotextile, nous utiliserons ci-après pour tout le système d'étanchéité le mot *géomembrane*, car c'est cette couche qui assure la fonction de barrière à l'eau que nous voulons analyser dans cet article. Comme tous les cas analysés sont des cas de réhabilitation, sur les sept barrages la géomembrane a été mise en œuvre en amont. La position centrale est en effet possible uniquement dans la construction de nouveaux barrages (CIGB-ICOLD, 2010).

Pendant l'installation en amont, les systèmes avec géomembranes couvertes et géomembranes exposées sont possibles. La première solution a été plus communément adoptée dans le passé, jusqu'à la fin des années 1970. À partir des années 1980, les nouvelles technologies dans le domaine des matières plastiques ont permis l'utilisation de géomembranes exposées, augmentant le nombre de barrages dans lesquels l'accroissement de la durabilité de la géomembrane ne justifiait pas le coût de la couche de couverture. Les premières applications exposées ont été décrites par Monari (1984) et Cazzuffi (1987).

2.3. Géomembranes employées

Les sept barrages présentés ici ont été réhabilités avec un géocomposite formé par :

- une géomembrane PVC ;

- un géotextile polyester (PET) non-tissé aiguilleté.

La géomembrane a la fonction d'assurer une barrière étanche sur le parement amont, grâce à sa très faible perméabilité. La couche en géotextile a deux fonctions importantes :

- une fonction anti-poinçonnement, contre la rugosité de la surface sur laquelle la géomembrane est mise en œuvre ;
- une fonction de drainage, pour éviter l'accumulation d'eau entre la géomembrane et le parement du barrage ; le drainage est assuré car le géotextile constitue une couche de transmissivité qui permet à l'eau de s'écouler par gravité dans un collecteur au pied du barrage.

Les deux couches, c'est à dire la géomembrane et le géotextile, ont des épaisseurs différentes et ont été thermocollées en usine afin de créer un géocomposite prête à être appliquée sur le barrage.

Le PVC a été choisi pour les sept barrages pour ses caractéristiques : il s'agit d'un matériau plastique qui s'est révélé être caractérisé par des performances intéressantes en termes de durabilité, de polyvalence et de coût (Krauskopf, 1993). En raison de ses propriétés, il est actuellement installé sur plus de 60% des barrages qui ont une géomembrane comme système d'étanchéité.

Le tableau 2 reporte les épaisseurs, la quantité et l'année d'application des géomembranes PVC installées sur les sept barrages considérés. L'orientation du barrage, qui joue un rôle important du point de vue du vieillissement des géomembranes, est aussi répertoriée.

Tableau 2. Principales caractéristiques des géomembranes installées sur les barrages

Barrage	Épaisseur [mm]	Surface [m ²]	Année d'application	Orienté vers
Piano Barbellino (Fig. 5)	2,0	6000	1987	E
Lago Nero (Fig. 2)	2,0	4000	1980/1981	NW
Camposecco	2,5	4800	1994	NW
Ceresole Reale	2,5	9000	1992	W
Laghi Gemelli	2,0	2460	1997	S
Cignana (Fig. 4)	2,5	8135	1985/1988	NW
Scais (Fig. 3)	2,5	14461	1993	NW

2.4. Composition et caractéristiques générales d'une géomembrane PVC

Le PVC résulte de la polymérisation du chlorure de vinyle monomère ; le matériau utilisé pour la fabrication des géomembranes en PVC est obtenu par la combinaison de la résine PVC (50 ÷ 70%) et de quantités variables d'autres ingrédients (Hsuan et al., 2008) :

- plastifiants (25 ÷ 35%), pour plus de souplesse et d'élasticité ;
- charges minérales (0 ÷ 10%), pour réduire les coûts ;
- noir de carbone (2 ÷ 5%), pour donner couleur, opacité et rendre le matériau résistant aux agents atmosphériques ;
- additifs (2 ÷ 5%), tels que des stabilisants (contre le vieillissement et la dégradation thermique) ou des lubrifiants (afin de rendre la fabrication plus facile).

Les propriétés du PVC et de la géomembrane dérivent des pourcentages de résine et d'autres composants.

Parmi les constituants mentionnés ci-dessus, les plastifiants jouent un rôle fondamental en ce qui concerne la variation des propriétés physiques de la matière vierge. En effet, ils sont les principaux responsables de l'obtention des qualités recherchées, qui les rendent appropriés pour les différents objectifs de l'application. Les plastifiants améliorent les propriétés physiques du PVC en le transformant d'un matériau raide et cassant en un matériau souple, facilitant ainsi le processus d'installation, en augmentant sa ductilité et sa dilatabilité (Blanco et al., 2008.). La teneur en plastifiants est l'une des caractéristiques les plus touchées par les modifications dues à l'exposition aux agents atmosphériques de la géomembrane. C'est la raison pour laquelle la variation de la teneur en plastifiants, en particulier sa diminution, représente un indice très efficace de la dégradation de la géomembrane.

2.5. Durabilité des géomembranes PVC exposées

La dégradation des géomembranes PVC dans le temps dépend de plusieurs causes, dont certaines sont déterminées par les propriétés intrinsèques de la géomembrane, tandis que d'autres sont gouvernées par les conditions environnementales dans lesquelles la géomembrane est posée.

L'élément principal qui pilote la dégradation est le matériau, c'est à dire la composition du PVC, la qualité de ses additifs, les pourcentages relatifs des composants, etc. (Blanco et al., 2010). Ce facteur est contrôlé par le fabricant et répertorié dans la fiche technique. Un autre facteur est l'épaisseur de la géomembrane.

En ce qui concerne les facteurs externes, ceux-ci peuvent appartenir à deux groupes principaux différents : les charges et les agents de l'environnement. Les charges peuvent inclure la gravité, le poinçonnage, les vagues ou la formation de glace dans le réservoir, et d'autres actions similaires qui modifient l'état de contrainte de la géomembrane. Les facteurs environnementaux se composent de la température, des rayonnements UV, des cycles séchage-humidité, des attaques chimiques ou biologiques par des substances ou des micro-organismes contenus dans l'eau.

Parmi tous ces facteurs, des études antérieures (Girard et al., 2002 ; Bartolomeo, 2003) ont démontré que la détérioration de la géomembrane, comme de l'ensemble du système d'étanchéité, dépend principalement des quatre facteurs suivants :

- température ;
- rayonnements UV ;
- épaisseur de la géomembrane ;
- temps d'exposition.

La température a une incidence directe sur les propriétés mécaniques de la géomembrane : des températures élevées provoquent une réduction du module de traction et une élévation de l'allongement, tandis que des températures basses provoquent l'effet inverse. Une variation de température peut aussi avoir des conséquences importantes, avec une augmentation du risque de fissuration sous contrainte.

Les UV provoquent la destruction de la structure moléculaire du polymère de base de la géomembrane, et une diminution significative de sa teneur en plastifiants. Il en résulte une baisse générale des propriétés de la géomembrane, telles qu'une diminution de la résistance à basse température et au poinçonnement, une diminution de l'allongement à la rupture et une rigidité plus élevée.

L'épaisseur de la géomembrane joue aussi un rôle très important : plus la géomembrane est épaisse, plus l'ensemble du système d'étanchéité est durable.

Les tentatives de modélisation par utilisation de modèles mathématiques différents, par exemple le modèle d'Arrhenius (Frassine, 2005 ; Hsuan et al., 2008), sont toujours dépendantes des facteurs propres au site, donc les résultats sont difficiles à généraliser et nécessitent une calibration continue du modèle. Par conséquent, afin de faire une analyse précise de la durabilité des géomembranes de PVC, il est nécessaire de surveiller constamment leur comportement au fil du temps. En fait, un bon programme de surveillance permet de découvrir d'autres facteurs de dégradation qui ne pouvaient être prévus dans la phase de conception. De plus, il est facile de comprendre comment, peu de temps après l'application, deux géomembranes identiques auront des caractéristiques différentes selon l'endroit où elles ont été installées. Étant donné que les géomembranes sont laissées exposées, des inspections et des contrôles réguliers sont nécessaires afin d'évaluer la détérioration de la géomembrane et la possibilité d'adopter des mesures correctives visant à ralentir ce processus.

3. Prélèvement et essais de laboratoire sur les géomembranes

3.1. Échantillonnage

Afin d'évaluer la variation dans le temps des caractéristiques des géomembranes de PVC installées sur les sept barrages considérés ici, un bon nombre d'échantillons ont été prélevés à différentes échéances après l'application ; tous les échantillons ont été soumis aux mêmes essais. Les échantillons ont été pris au-dessus et au-dessous du niveau de l'eau et dans des différentes parties du parement, pour étudier le comportement de la même géomembrane dans différentes conditions d'exposition.

Pour la détermination de la durée de vie d'une géomembrane, il est important d'identifier la partie la plus critique du parement. Par conséquent, ici nous présentons les résultats des essais effectués sur des échantillons prélevés au-dessus du niveau de l'eau, car c'est la zone qui est la plus exposée aux agents atmosphériques. Les résultats obtenus correspondent ainsi aux conditions les plus défavorables pour chaque géomembrane.

Pour chaque barrage nous avons prélevé deux ou trois échantillons (cinq seulement dans le cas de Ceresole Reale) de différents âges. Dans le détail :

- Piano Barbellino (Fig. 5) : 8 ans (1995), 10 ans (1997) et 23 ans (2010) après l'application ;

- Lago Nero (Fig. 2) : 14 ans (1995), 16 ans (1997) et 29 ans (2010) après l'application ;
- Camposecco : échantillon vierge (1994), 2 ans (1996) et 5 ans (1999) après l'application ;
- Ceresole Reale : échantillon vierge (1992), cinq ans (1997), 11 ans (2003), 15 ans (2007) et 19 ans (2011) après l'application ;
- Laghi Gemelli : échantillon vierge (1997), 3 ans (2000) et 13 ans (2010) après l'application ;
- Cignana (Fig. 4) : 7 ans (1996), 10 ans (1999) et 24 ans (2013) après l'application ;
- Scais (Fig. 3) : échantillon vierge (1993), 18 ans (2011) et 20 ans (2013) après l'application.



Figure 4. Échantillon au barrage de Cignana. Figure 5. Échantillon au barrage de Piano Barbellino.

3.2. Essais de laboratoire

Tous les échantillons prélevés sur les parements amont des barrages ont été testés au Laboratoire Géosynthétiques de CESI à Milan et à Piacenza, Italie. Les essais ont permis de comparer le processus de dégradation des géomembranes des différents échantillons. Les cas de Camposecco, Ceresole Reale, Laghi Gemelli et Scais (Fig. 3) sont particulièrement importants car les résultats des essais des échantillons neufs étaient disponibles ; la connaissance des données initiales rend l'étude plus précieuse car elle permet de reconstituer la vie de la géomembrane.

Avant les essais, les échantillons ont été préparés par la séparation de la couche de géotextile de celle de la géomembrane. Ici, nous allons discuter seulement les essais faits sur cette deuxième couche, selon les normes indiquées dans le tableau 3. Les résultats sont reportés sur les figures 6 à 12., dont la légende est reportée ci-dessous.

Tableau 3. Tests de laboratoire et normes de référence

Test	Norme de référence
Extraction Plastifiants	ISO 6427:1998
Épaisseur Nominal	EN 1849-2:2010
Masse Volumique (densité)	EN ISO 1183-1:2005
Dureté (shore A)	EN ISO 868:1999
Flexibilité à Froid	EN 1109:2002
Stabilité Dimensionnelle	EN 1107-2:2002
Propriété de Traction	EN 12311-2:2002
Transmission Vapeur d'Eau	EN 1931:2002

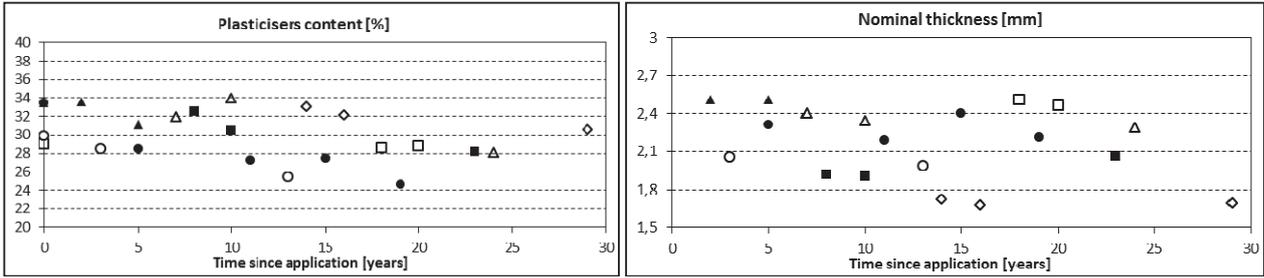


Figure 6. Variations de la teneur en plastifiants et de l'épaisseur nominale en fonction du temps.

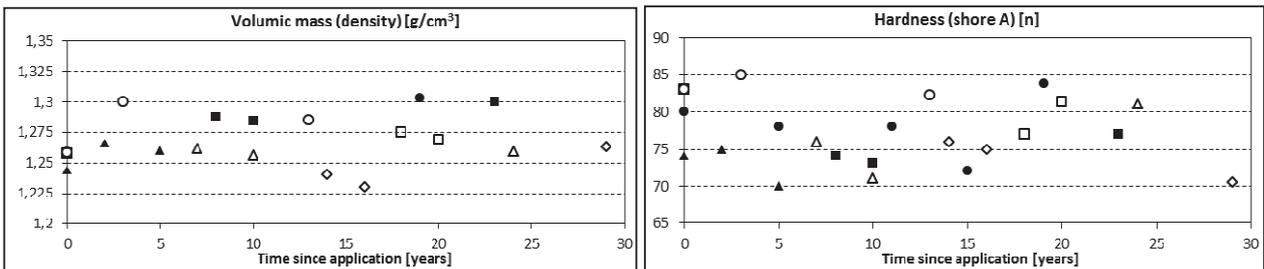


Figure 7. Variations de la masse volumique et de la dureté Shore A en fonction du temps.

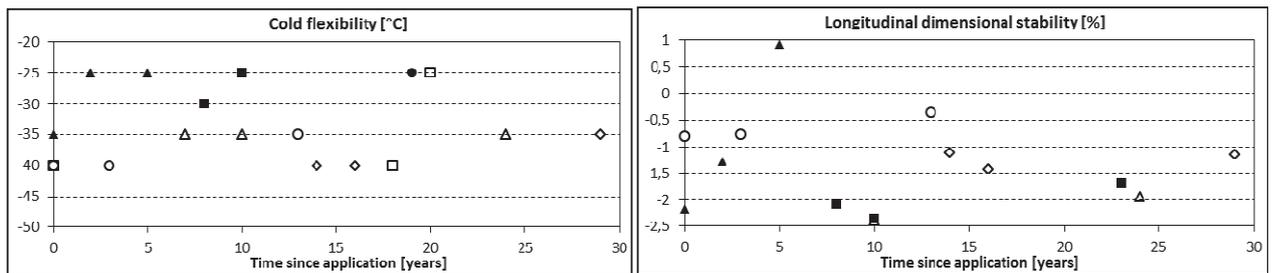


Figure 8. Variations de flexibilité à froid et de la stabilité dimensionnelle longitudinale en fonction du temps.

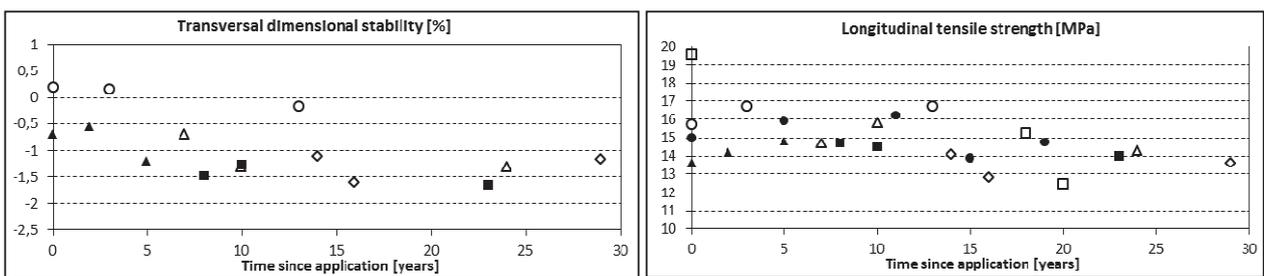


Figure 9. Variations de la stabilité dimensionnelle transversale et de la résistance à la traction longitudinale en fonction du temps.

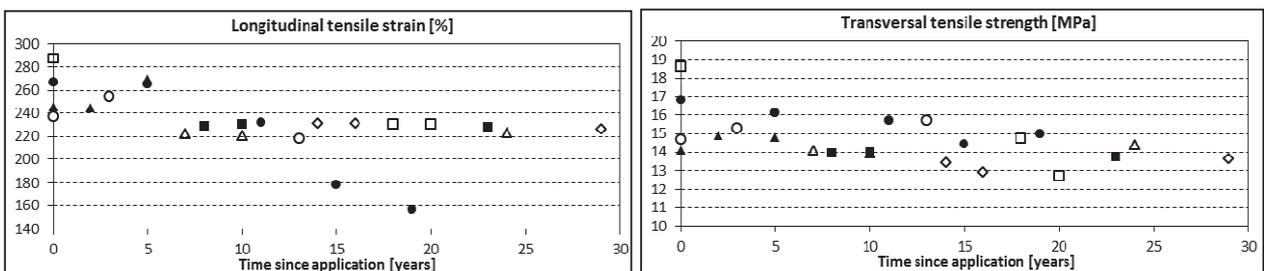


Figure 10. Variations de contrainte de traction longitudinale et de la résistance transversale à la traction en fonction du temps.

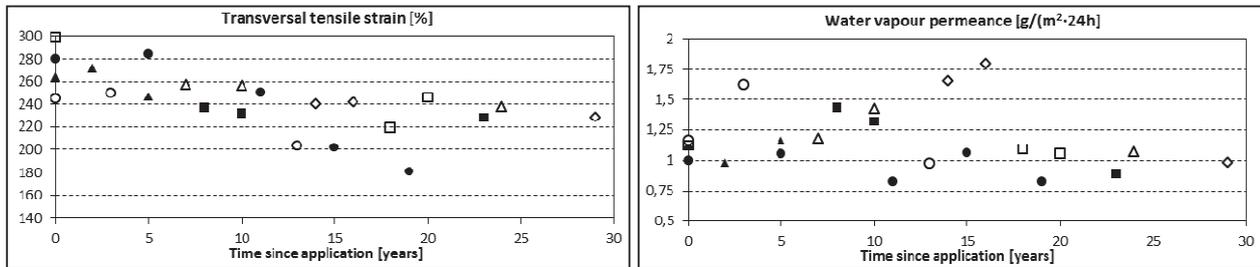


Figure 11. Variations de la déformation transversale à la traction et de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction du temps.

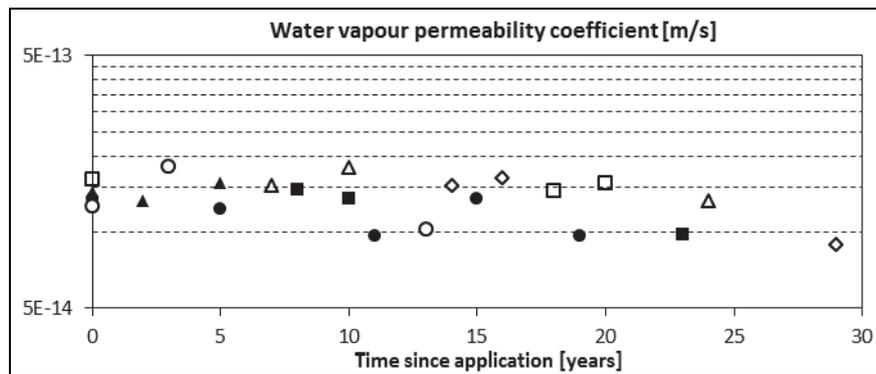


Figure 12. Variation du coefficient de perméabilité à l'eau en fonction du temps.

Les résultats obtenus montrent une faible diminution de la teneur en plastifiant (Figure 6 à gauche) et une diminution moyenne de l'épaisseur nominale (Figure 6 droite). La température de flexibilité à froid augmente au cours du temps (Figure 8 gauche), alors que la stabilité dimensionnelle grandit longitudinalement et diminue transversalement au cours des années, car elle dépend des conditions déterminées par le système d'application vertical (Figure 8 droite et Figure 9 gauche).

Les paramètres mécaniques montrent que la géomembrane devient plus rigide dans le temps, avec une augmentation de résistance à la traction et une réduction de la tension correspondante, soit dans le sens longitudinal que transversal (Figures de 9 droite à Figure 11 gauche).

En ce qui concerne les propriétés d'étanchéité, les résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur montrent en général une diminution du coefficient de perméabilité, ainsi qu'une amélioration de l'étanchéité des géomembranes (Figures 11 droite et 12).

4. Conclusions

Cet article examine le comportement des géomembranes PVC installées sur le parement amont de sept barrages italiens sans aucune protection externe (voir aussi Cazzuffi et al., 2010). Un programme expérimental a été lancé afin d'étudier la durée des géomembranes PVC exposées et plusieurs essais ont été effectués sur des échantillons prélevés directement sur place dans les vingt dernières années. Les résultats obtenus montrent une constante mais faible diminution de la teneur en plastifiants et une diminution moyenne de l'épaisseur nominale. La température de flexibilité à froid augmente au cours du temps, alors que la stabilité dimensionnelle croît longitudinalement et diminue transversalement au cours des années, car elle dépend des conditions aux limites de la géomembrane déterminées par le système d'application.

Les paramètres mécaniques montrent que la géomembrane devient plus rigide dans le temps, avec une augmentation de résistance à la traction et une réduction de la tension correspondante, autant dans le sens longitudinal que transversal.

En ce qui concerne les propriétés d'étanchéité, les résultats de l'essai de perméabilité à la vapeur d'eau montrent en général une diminution du coefficient de perméabilité à l'eau, donc une amélioration de l'étanchéité des géomembranes.

Par conséquent, les essais révèlent que les problèmes les plus préoccupants dans la durabilité des géomembranes exposées sont représentés par la dégradation des propriétés mécaniques (flexibilité, élasticité, etc.), mais que l'efficacité de la fonction fondamentale de la barrière n'est pas critique.

Le paramètre qui indique un clair comportement est le contenu des plastifiants : il se révèle être un bon indicateur pour l'évaluation de la durée de vie des géomembranes.

En outre, les résultats des essais montrent que les géomembranes ont besoin d'un suivi constant et d'une étude fréquente sur site. En effet, il est important d'identifier les signes de détérioration et d'évaluer s'ils appartiennent à la tendance normale de la vie de la géomembrane ou une aggravation soudaine des conditions du système d'étanchéité pour d'autres raisons inattendues a eu lieu.

5. Références bibliographiques

- Bartolomeo P. (2003). Vers une prévision de la durée de vie des polymères géosynthétiques. Principes de base – État de l'art. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 243, réf. 4456, pp. 47-69.
- Blanco M., et al. (2008). Study of plasticizers used in PVC-P geomembranes from La Palma island. *II National Waterproofing Congress: Building and Public Works and II International Congress about Project, Building and Waterproofing of Reservoirs*, Palma de Mallorca, pp. 461-469.
- Blanco M., et al. (2010). Influence of plasticizer type in PVC-P geomembranes durability. *III National Waterproofing Congress: Building and Public Works and Reservoirs*, Barcelone pp. 347-357.
- Cazzuffi D. (1987). The use of geomembranes in Italian dams. *Water Power and Dam Construction*, vol. 39, p. 3, pp. 17-21.
- Cazzuffi D. (1996). Réhabilitation de barrages en maçonnerie ou en béton à l'aide de géomembranes: l'expérience italienne. *Comptes rendus du colloque technique "Les géotextiles et les géomembranes dans les barrages"*, Paris, p. 14, 1-12.
- Cazzuffi D. (1998). Long term performance of exposed geomembranes on dams in Italian Alps. *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, pp.1477-1480.
- Cazzuffi D. (2013). Long-time behavior of exposed geomembranes used for the upstream face rehabilitation of concrete and masonry dams. *Proceedings of the 9th ICOLD European Club Symposium*, Venise, pp. 8.
- 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*, Guarujá, Brésil, Vol. 1, pp. 115-163.
- CIGB-ICOLD. (2010). Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages - Principes de conception et retour d'expérience. *Bulletin 135 de la Commission Internationale des Grands Barrages*, Paris, pp. 69-109
- Frassine R. (2005). Development and experimental validation of a model for the prediction of the long-time behavior of exposed PVC geomembranes on dams. (in Italian), *Politecnico di Milano*, 31 pages.
- Girard H., et al. (2002). Durability of PVC-P geomembranes used in hydraulic structures : feedback on experience. *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, pp. 709-712.
- Hsuan Y.G. et al. (2008). Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics, *Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference EuroGeo 4*, Edinburgh. Keynote paper.
- Krauskopf L.G. (1993). Plasticizer structure/performance relationships. *Journal of Vinyl Technology*, 15, No. 3, pp.140-147.
- Monari F. (1984). Waterproof covering for the upstream of the Lago Nero dam. *Proceedings of the International Conference on Geomembranes*, Denver, pp. 1, 105-110.
- Scuero A., Vaschetti G. (1996). Geomembranes for Masonry and Concrete Dams: State of the Art Report. *Proceedings of the 1st European Geosynthetics Conference EuroGeo 1*, Balkema, Maastricht, pp. 889-896.

