

ÉVALUATION DU VIEILLISSEMENT DE DEUX GÉOMEMBRANES BITUMINEUSES DE DIFFÉRENTES NATURES APRÈS 15 ANS EN SERVICE

EVALUATION OF THE AGEING OF TWO BITUMINOUS GEOMEMBRANES OF DIFFERENT NATURES AFTER 15 YEARS IN SERVICE

Nathalie TOUZE-FOLTZ¹, Fabienne FARCAS², Renaud BENCHET³

¹ Irstea, Antony, France

² IFSTTAR, Champs-sur-Marne, France

³ SIPLAST-ICOPAL, Antony, France

RÉSUMÉ – Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale dont l'objectif est d'évaluer le comportement de deux familles chimiques de géomembranes bitumineuses, l'une en bitume élastomère et l'autre en bitume oxydé, installées dans deux parties différentes d'un même bassin, après 15 ans en service. On donne tout d'abord une présentation de la différence entre les bitumes élastomère et oxydé entrant dans la fabrication des géomembranes bitumineuses. Les résultats de l'inspection visuelle des géomembranes, des mesures de flux, et l'essai d'analyse par perméation de gel (GPC) sont présentés. Dans le cas reporté ici, la performance hydraulique de la géomembrane en bitume oxydé est d'un ordre de grandeur inférieur à celle du bitumé élastomère en lien avec la fragilisation du bitume.

Mots-clés : géomembrane, bitume, oxydé, élastomère, performance.

ABSTRACT – This paper presents the results of an experimental study aiming at evaluating the performance of two different bituminous geomembranes, an elastomeric bituminous geomembrane and an oxidized bituminous geomembranes, installed in two parts of the same pond, in France, after 15 years in service. A presentation of the difference between elastomeric and oxidized bitumen is first given to clarify the differences existing between the two varieties of bitumen used in the manufacturing of geomembranes, resulting in different properties. Results of the visual inspection of the geomembrane, of flow rate measurement and size exclusion chromatography tests are then presented. In the case reported here the oxidized bituminous geomembrane performance is less by one order of magnitude than that of the elastomeric bituminous geomembrane in relation with bitumen embrittlement.

Keywords: geomembrane, bitumen, oxidized, elastomeric, performance.

1. Introduction

Les géosynthétiques ont été largement utilisés ces trente dernières années dans de nombreuses applications hydrauliques et environnementales. De nombreux exemples de telles utilisations ont été rapportés. Différents enseignements ont pu être tirés de l'expérience relativement aux différentes structures concernées aux différents stades de conception et de réalisation : dimensionnement, phases de tests préliminaires, construction, contrôle. Heibaum et al. (2006) indiquent que la plus grande diversité d'utilisation des géosynthétiques est réalisée dans les ouvrages hydrauliques. Ces auteurs indiquent également, à partir d'une large revue de la bibliographie, que la durabilité des géomembranes dans les ouvrages hydrauliques peut atteindre 20 à 30 ans, voire plus, pour des géomembranes exposées, pour autant que leur formulation soit adaptée et que le dispositif d'étanchéité par geomembrane (DEG) dans son ensemble ait été bien conçu, construit et contrôlé. La durée de vie attendue des géomembranes recouvertes, qui sont ainsi protégées des conditions climatiques et des agressions mécaniques, est significativement plus longue, toujours d'après ces auteurs.

D'autres articles ont récemment présenté des retours d'expérience relatifs à la durée de vie des géomembranes en relation avec leur nature, pour des géomembranes en polychlorure de vinyle plastifié (PVC-P) (Carreira et Tanghe, 2008 ; Girard et al., 2002 ; Newman et al., 2002 ; Blanco et al., 2012a,b,c), des géomembranes en polypropylène flexible (PP-F) (Peggs, 2008 ; Wallace, 2008), polyéthylène haute densité (PEhd) (Baldauf et al., 2012, Blanco et al., 2012a) et en éthylène propylène diène terpolymère (EPDM) (Blanco et al., 2012a,d, 2014). Les géomembranes pour lesquelles le moins d'informations disponibles existent sont les géomembranes bitumineuses. Un seul article à ce jour de Touze-Foltz et al. (2010) donne des informations relatives au flux mesuré dans les géomembranes en bitume oxydé selon la norme NF EN 14150 (AFNOR, 2006), pour six géomembranes en bitume oxydé dans 5 bassins et

deux barrages. Les auteurs indiquent que les résultats obtenus ne peuvent pas être étendus pour les géomembranes en bitume élastomère.

Le premier objectif de cet article est, par conséquent, de décrire en détail les deux types de bitume, oxydé et élastomère, qui peuvent être utilisés dans la fabrication des géomembranes en mettant les différences en exergue. Le second objectif est par la suite, en gardant présentes à l'esprit les différences de propriétés des deux différents types de bitumes, de présenter le comportement et la performance d'une géomembrane en bitume oxydé et d'une géomembrane en bitume élastomère utilisées dans le même bassin, après 15 ans de service. Ces résultats complètent ceux présentés par Benchet et al. en 2013.

L'objectif du paragraphe 2 de cet article est de donner une introduction sur la fabrication des géomembranes bitumineuses et sur les deux familles de bitume existantes, oxydé et élastomère. Le site de prélèvement ainsi que les échantillons seront présentés dans le paragraphe 3. On présente également dans ce paragraphe les méthodes d'essai utilisées. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le paragraphe 4.

2. Géomembranes bitumineuses

Les géomembranes bitumineuses sont des matériaux composites. Elles sont constituées de l'association d'un liant bitumineux étanche et d'un renforcement ainsi que d'un traitement sur les deux faces.

Le renforcement peut être de trois types : (1) un voile de verre, (2) un géotextile non tissé aiguilleté en polyester, et (3) un composite associant voile de verre et polyester. Le rôle du renforcement est de reprendre les contraintes mécaniques, qui sont imposés à la géomembrane pendant son installation ou pendant la phase où l'ouvrage est en service. Le renforcement va conférer à la géomembrane sa performance en traction, au poinçonnement statique, dynamique et à la déchirure. Ces éléments suivent deux traitements en général lors de la fabrication des géomembranes bitumineuses ; le premier est l'imprégnation du renforcement par un liant bitumineux, oxydé ou élastomère. L'imprégnation consiste à saturer le cœur de l'armature, dans le but de remplir les vides pour enlever l'air et l'humidité résiduelle. L'enduction consiste à ajouter une masse de bitume sous ou sur l'armature afin de donner à la géomembrane son épaisseur finale. Cette épaisseur assure une liaison au recouvrement des bandes. L'armature est nécessaire pour les phases de stockage, manutention et installation de la géomembrane.

L'ajout de sable et d'un film sur les faces de la géomembrane permet non seulement d'éviter que les spires attachent lors de l'enroulement de la géomembrane mais permettent également d'accroître l'angle de frottement (sable) ou d'assurer une fonction anti-racinaire (film).

Le bitume est un matériau obtenu après double distillation (distillation à pression atmosphérique suivie d'une distillation sous vide) d'un pétrole brut lourd. Ces deux opérations conduisent à l'obtention d'un bitume de distillation directe comportant deux fractions principales distinctes: (1) la fraction huileuse, les maltènes, et (2) la fraction précipitée de solvants n-alcane, les asphaltènes. Le bitume ainsi obtenu par distillation ne peut pas être directement utilisé pour produire des géomembranes car il est trop sensible à la température. En effet, la gamme de températures utile, entre la température de fusion et la température de transition vitreuse qui peuvent être variables selon le grade du bitume utilisé, est seulement de quelques dizaines de degrés (fluage sous son propre poids dès 40°C et fragilité à froid). Il est par conséquent nécessaire de réduire la sensibilité à la température en transformant le matériau de base soit : (1) en l'oxydant par insufflation d'air chaud (260°C et 320°C), en produisant ainsi des asphaltènes par la consommation d'une partie des maltènes, ou (2) en ajoutant des élastomères comme le SBS (styrène-butadiène-styrène).

Le bitume oxydé, mélangé à des charges, forme une masse compacte dont la température de fluage est d'environ +80°C, la température de fragilité à basse température de 0°C, la rémanence de 0% et l'allongement de quelques pourcents. Le bitume élastomère mélangé forme une masse étanche dont la température de fluage est d'environ + 120°C à + 130°C, la température de fragilité à basse température est comprise entre -20°C et -30°C, la rémanence est inférieure à 10% et l'allongement à la rupture est supérieur à 1500 %.

De nos jours les bitumes oxydés correspondant à une technologie ancienne ne sont presque plus utilisés. L'utilisation des membranes en bitume oxydé est proscrite en France pour les applications en bâtiment (AFNOR 2004) et en ouvrages souterrains (Bulletin Officiel, 2012). Les géomembranes en bitume élastomère remplacent depuis déjà plusieurs années cette ancienne technologie, compte-tenu de leur meilleure résistance, pour des géomembranes exposées, comme cela va être mis en évidence dans la suite de cet article.

3. Matériels et méthodes

3.1. Présentation du site

Le site de Bazancourt est une raffinerie de sucre située dans la Marne. Le site dispose de neuf bassins. Le bassin 5 est utilisé pour collecter des eaux de process issues de la raffinerie. Il a été construit comme une extension du bassin 4 en ajoutant une seconde partie symétrique de l'existante (Figure 1).



Figure 1. Vue du bassin 5 du site de Bazancourt au moment du prélèvement des géomembranes

Une géomembrane en bitume oxydé a été utilisée pour étancher la première moitié du bassin, tandis qu'une géomembrane en bitume élastomère (Teranap 431 TP) a été utilisée pour réaliser l'extension. L'étanchéité a été posée en 1997 pour ces deux parties. Les échantillons ont été prélevés en haut de la pente au-dessus de la zone de marnage, exposition sud, en août 2013.

Le sol sous-jacent est constitué de craie compactée stabilisée ou non avec des liants hydrauliques. Un géotextile de 300g/m² a été intercalé entre le sol-sous-jacent et la géomembrane.

La capacité de stockage du bassin est de 70,000 m³. L'angle du talus est de 45 degrés et la longueur du rampant de cinq mètres. Le bassin est en général plein de novembre à août.

Le nettoyage des boues générées par les eaux de process s'effectue par jet d'eau sur la partie basse des talus et à la pelle mécanique en fond d'ouvrage, cette partie étant protégée par une couche de béton bitumineux.

Au cours des quinze dernières années, les températures extrêmes ont fluctué entre -13°C pour les mois les plus froids et +39°C pour les plus chauds, avec une température annuelle moyenne comprise entre +6,1°C et +15,1°C. Au cours des dix dernières années, la durée moyenne d'ensoleillement a varié entre 1274 et 2026 heures.

3.2. Géomembranes

Une géomembrane en bitume oxydé et une géomembrane en bitume élastomère ont été utilisées afin d'assurer l'étanchéité du bassin 5.

Les figures 2a et 2b montrent les aspects respectifs des états de surface des deux géomembranes au moment du prélèvement. On peut observer qu'à la surface de la géomembrane en bitume oxydé le bitume d'enduction est rare et que l'on aperçoit la trame de l'armature imprégnée de bitume. On parlera ici de micro-fissuration. La surface de la géomembrane en bitume élastomère est différente. On aperçoit un faïençage superficiel, qui reste limité à la surface du bitume d'enduction encore bien présent. Aucune micro-fissuration (fissure dans la masse de bitume qui pénètre jusqu'à l'armature) à la surface n'est visible pour cette géomembrane, contrairement à ce qui a été observé par Touze-Foltz et al. (2010), pour des géomembranes en bitume oxydé exposées.



Figure 2. Vues de la surface de la géomembrane en bitume oxydé (a) et de la géomembrane en bitume élastomère (b)

3.3. Quantification du débit à travers les géomembranes

Les géomembranes sont des milieux non poreux. Ceci signifie que ces matériaux ne contiennent pas de vides, mais seulement des espaces libres dont la taille est proche de celle des molécules de solvants (Lambert et Touze-Foltz, 2000). Un essai normalisé a été élaboré en France dans les années 1990 qui depuis est devenu l'essai européen décrit par la norme NF EN 14150 (AFNOR, 2006). L'objectif de cet essai normalisé est de quantifier le flux d'eau traversant les géomembranes lorsqu'elles sont soumises à une différence de charge hydraulique. Le dispositif expérimental et la procédure d'essai permettent des mesures de flux aussi faible que $10^{-6} \text{m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ sous 100 kPa de différence de pression hydraulique.

L'appareillage de mesure est constitué d'une cellule en deux parties, de contrôleurs pression-volume dont l'objectif est d'appliquer la pression désirée sur chacune des faces de la géomembrane et de mesurer les variations de volume dans chacune des chambres de la cellule, et d'un ordinateur pour l'enregistrement des données (Figure 3).

L'éprouvette de géomembrane est enserrée entre les deux parties de la cellule cylindrique. Un mastic bitumineux peut être appliqué aux bords de la cellule dans le cas où des géomembranes bitumineuses sont testées pour éviter les fuites. Dans les deux parties de la cellule générées par l'installation de la géomembrane, les deux chambres de 0,2 m de diamètre permettent d'appliquer une différence de pression de 100 kPa entre les deux faces de la géomembrane.

À l'aval de la géomembrane, un disque en inox fritté permet de prévenir toute déformation de la géomembrane liée à la différence de pression appliquée entre les deux faces, supérieure à l'amont. Les deux chambres de la cellule sont équipées de purges afin d'évacuer l'air de la cellule avant le démarrage de l'essai (Lambert et Touze-Foltz, 2000).

La mesure du volume est effectuée en utilisant des contrôleurs pression-volume (dispositif de type B dans la norme). Ce dispositif permet l'application d'une pression constante tout en mesurant les variations de volume.

La validité de la mesure est examinée en comparant les flux amont et aval. En théorie, ces valeurs doivent être égales mais, dans la pratique, c'est rarement le cas. Pour des valeurs de flux supérieures à $10^{-6} \text{m}^3/\text{m}^2/\text{j}$, les valeurs de flux amont et aval sont considérées comme égales si la différence entre elles est inférieure à 10%.

3.4. Chromatographie d'exclusion stérique

Issus du traitement des pétroles bruts, les bitumes sont des mélanges complexes de composés hydrocarbonés de masses moléculaires et de structures chimiques différentes. Les propriétés viscoélastiques des bitumes jouent un rôle déterminant dans les performances des géomembranes. Pour améliorer les propriétés des bitumes du point de vue de leurs performances comme la résistance à la déformation permanente, la fissuration à basse température, la fatigue associée à la charge et à l'usage, le désenrobage et vieillissement, on utilise souvent des bitumes polymères (BmP) obtenus en incorporant un polymère dans un bitume pur par mélange mécanique et/ou réaction chimique (Korhonen

et Kellomäki, 1996). Les propriétés des bitumes polymères (BmP) dépendent des caractéristiques du bitume (caractéristiques physiques, composition chimique), du polymère (nature, masse moléculaire),



Figure 3. Appareillage de mesure selon la norme NF EN 14150

de la teneur en polymère et du procédé de mélange (Isacsson et Lu, 1999). Toutefois, les propriétés améliorées de ces BmP peuvent évoluer au cours du vieillissement pendant le mélange, au moment de la fabrication de la GMB, du stockage, de la mise en service et de l'utilisation (Lu and Isacsson 1998). La connaissance de l'évolution de la structure chimique du liant bitumineux représente un moyen de caractériser son vieillissement en relation avec ses performances. Le vieillissement des bitumes purs est un processus complexe dont la complexité augmente lorsqu'il s'agit de bitumes modifiés. La principale cause de vieillissement des liants bitumineux pendant le service est l'oxydation de certaines molécules et la dégradation du polymère. L'oxydation du bitume résulte de la formation de groupements polaires qui interagissent avec les groupes fonctionnels qui contiennent de l'oxygène (Petersen, 1998). L'oxydation se traduit par la formation de molécules et d'associations moléculaires de grandes tailles (Lesueur, 1998 ; Mouillet et al., 2011). La dégradation du polymère résulte de la coupure des chaînes de polymère qui conduit à la formation d'oligomères de tailles plus petites que celles des polymères (Mouillet et al., 2008). Ces modifications de tailles moléculaires sont facilement mises en évidence par chromatographie d'exclusion stérique (CES), technique qui permet de séparer les molécules d'un mélange en fonction de leur taille.

Les analyses de CES ont été réalisées sur les liants bitumineux récupérés des GMB en bitume oxydé et en bitume élastomère prélevés dans le bassin 5. Des solutions bitumineuses de concentration 2% (masse/volume) en GMB dans du tétrahydrofurane (THF) ont été analysées. Pour les deux GMB, 0,1 g de bitume situé au cœur de la GMB (c'est-à-dire au contact de trame polymérique) a été immergé dans 5 mL de THF. Une fois le bitume solubilisé, la solution a été filtrée sur un filtre seringue Wathman en PTFE de 0,45 μm pour éliminer toutes les particules solides. 50 μL de la solution bitumineuse ont été injectés dans le système chromatographique équipé d'une pompe Waters 610 pilotée par un contrôleur 600. La détection a été réalisée par un réfractomètre différentiel Waters 4214. Les séparations ont été menées à l'aide d'une série de deux colonnes "PL Mixed-D 5 μm " et d'une pré-colonne "PLgel 5 μm " fournies par Polymer Laboratories. Les acquisitions et les traitements ont été faits à l'aide du logiciel AZUR V4.6 fourni par Datalys (Saint Martin d'Hères, France). La phase mobile est du THF pour HPLC fourni par Carlo Erba Reactifs – SDS (Val de Reuil - France) à un débit de 1 mL/min.

4. Résultats obtenus

4.1. Mesures de flux

Dans le cas des géomembranes testées dans cette étude, la différence de pression appliquée entre les deux chambres de la cellule était égale à 50 kPa et non 100 kPa. En effet, on a déjà observé pour des géomembranes bitumineuses prélevées in situ qu'il n'était pas possible d'appliquer la charge hydraulique prescrite dans la norme car elle donne lieu à des débits de fuite trop importants en lien avec le vieillissement possible de la géomembrane. Cette précaution a donc été adoptée ici.

L'évolution du flux en fonction du temps pour la géomembrane en bitume élastomère est présentée sur la figure 4. Des fluctuations sont observées. Elles peuvent être attribuées aux variations de

température dans le laboratoire, qui affectent les mesures principalement pour les faibles valeurs de flux. La valeur finale du flux obtenue à l'équilibre sur sept jours est égale à $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$. Elle est à peine supérieure aux valeurs obtenues pour des géomembranes vierges (inférieures à $10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$).

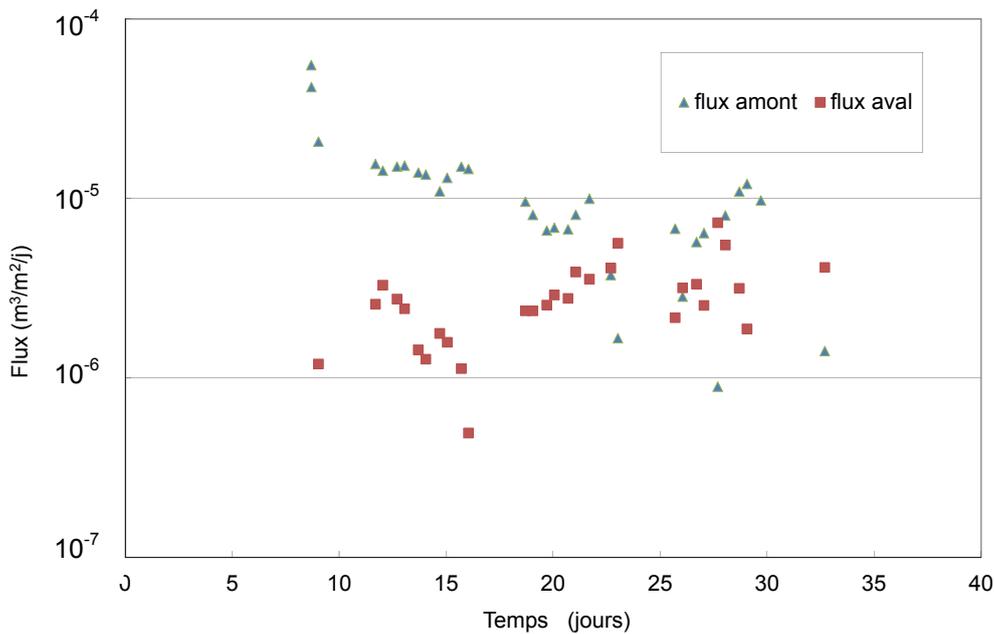


Figure 4. Mesure des valeurs de flux dans les chambres amont et aval en fonction du temps pour la géomembrane en bitume polymère.

Les résultats sont présentés sur la figure 5 pour le cas de la géomembrane en bitume oxydé. Les flux mesurés sont respectivement égaux à $4,65 \cdot 10^{-5}$ et $4,49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ à l'amont et à l'aval de la géomembrane sous une différence de pression de 50kPa. Les flux peuvent donc être considérés comme égaux. Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs de flux précédemment mesurées par Touze-Foltz et al. (2010) pour des géomembranes en bitume oxydé exposées. Les flux sont donc d'un ordre de grandeur supérieures à ceux mesurés pour une géomembrane en bitume élastomère dans les conditions du site de Bazancourt.

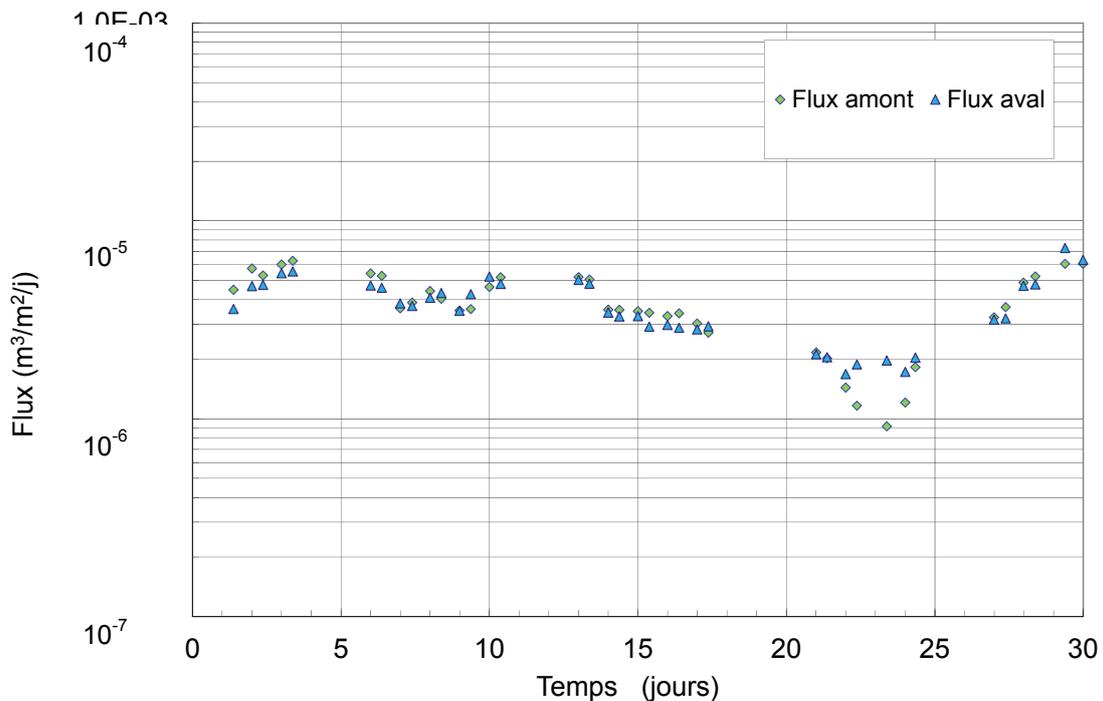


Figure 5. Mesure des valeurs de flux dans les chambres amont et aval en fonction du temps pour la géomembrane en bitume oxydé

4.2. Chromatographie d'exclusion stérique

Les chromatogrammes des liants extraits des GMB (figure 6) permettent d'identifier le polymère par trois pics mal résolus à 10,4 mL, 11,0 mL et 11,5 mL. Le bitume oxydé élue entre 12,0 mL et 19,1 mL alors que le bitume du liant modifié par l'élastomère élue entre 13,5 mL et 19,1 mL. La largeur du chromatogramme du bitume oxydé accompagnée d'un épaulement important à 14,8 mL met en évidence la présence d'entités de grandes tailles.

La teneur en polymère, calculée en considérant le rapport de la surface du pic du polymère par rapport à la surface de la totalité du liant (bitume + polymère) est de $9,5\% \pm 0,36\%$ après 15 ans d'utilisation.

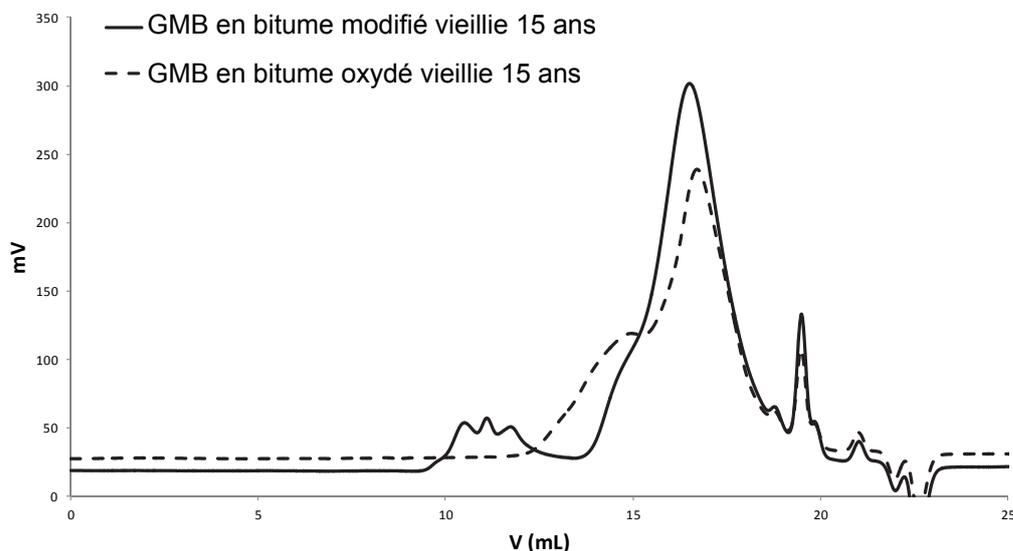


Figure 6. Chromatogrammes des liants bitumineux extraits des GMB en bitumes polymère et oxydé.

La comparaison des chromatogrammes des bitumes représentés sur la figure 6 montre bien l'absence de pic du polymère dans le bitume oxydé et les différences de structure chimique entre les deux types de liants bitumineux. L'épaulement à 14,8 mL est beaucoup plus important pour le bitume oxydé que pour le bitume polymère. Ceci s'explique par la présence de fonctions chimiques oxydées (majoritairement des carbonyles et des sulfoxydes) et de molécules de grandes tailles.

Il est aujourd'hui bien connu que les fonctions chimiques oxydées sont à l'origine de la formation d'associations moléculaires en grande partie responsables du durcissement et de la fragilité du bitume (Lu and Isacson, 1998 ; Petersen, 1984 ; Brulé et al., 1987). De plus les molécules de grandes tailles qui se solidifient à des températures plus hautes que les molécules de plus petites tailles rendent le bitume plus sujet à la fissuration (Michalica et al., 2008).

Seule la comparaison avec les résultats obtenus par l'analyse des GMB neuves devrait permettre d'évaluer leur vieillissement chimique et physique (Cela aurait été plus intéressant).

5. Discussion

Les résultats présentés dans la partie 4 ont mis en évidence une différence de comportement entre la géomembrane en bitume oxydé et la géomembrane en bitume élastomère utilisées dans un même bassin après 15 ans en service.

L'aspect visuel de la surface des deux géomembranes est différent. Le bitume est rare et l'armature visible sur la géomembrane en bitume oxydé. La surface de la géomembrane en bitume élastomère est différente. Un faïençage est observé. Pour autant, il n'apparaît qu'en surface et le renforcement n'est pas visible puisque le liant d'enduction est encore bien présent.

Les flux mesurés dans les deux géomembranes sont proches de $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ et $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ respectivement pour la géomembrane en bitume oxydé et la géomembrane en bitume élastomère. On observe donc un ordre de grandeur de différence sur la valeur du flux mesuré, en lien avec la réduction de la quantité de bitume en face supérieure de la géomembrane en bitume oxydé.

L'observation de microfissures à la surface de la géomembrane en bitume oxydé peut être reliée à la fragilisation et par suite à la fissuration du bitume oxydé, en relation avec la présence de fonctions chimiques oxydées qui sont plus présentes dans la géomembrane en bitume oxydé que dans la géomembrane en bitume élastomère.

Ajouté à un bitume contenant peu d'associations moléculaires, le polymère actif est toujours présent dans la géomembrane en bitume élastomère au bout de 15 ans. Cette dernière maintient de bonnes propriétés physiques, contrairement au bitume oxydé, et présente aussi une performance hydraulique après 15 ans permettant de satisfaire aux critères de perméabilité fixés dans la norme NF P84-500 à $10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$, ce qui n'est pas le cas des géomembranes en bitume oxydé présentées dans cette étude.

La géomembrane en bitume élastomère présente donc, pour les conditions présentées ici, un meilleur état de conservation physique et une meilleure performance hydraulique que la géomembrane en bitume oxydé 15 ans après leur installation.

Ce résultat démontre que les deux familles de géomembranes bitumineuses présentent des différences de comportement. Il renforce également la recommandation précédemment effectuée de recouvrir les géomembranes en bitume oxydé et non de les laisser exposées (Touze-Foltz et al., 2010), ce qui peut être évité pour la géomembrane en bitume élastomère étudiée ici.

6. Conclusion

L'objectif de cet article était d'évaluer la performance de deux géomembranes bitumineuses de nature différentes, l'une avec un bitume oxydé et l'autre avec un bitume élastomère, installés dans le même bassin depuis 15 ans.

Les différences de composition et de propriétés des bitumes oxydés et élastomères ont tout d'abord été exposées.

Les résultats obtenus, en termes d'état de surface, de mesure de flux et de chromatographie d'exclusion stérique, ont ensuite été présentés.

La valeur de flux mesurée pour la géomembrane en bitume élastomère sous une différence de pression de 50 kPa est légèrement supérieure au seuil de mesurabilité donné dans la norme NF EN 14150, qui correspond aussi aux valeurs obtenues pour des géomembranes vierges ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$), avec une valeur de $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$. Le flux mesuré pour la géomembrane en bitume oxydé est proche de $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$, soit un ordre de grandeur supérieur à la valeur obtenue pour la géomembrane en bitume élastomère.

Ce résultat a été expliqué par la différence d'état de surface des deux géomembranes. La fragilisation notée sur la géomembrane en bitume oxydé, contrairement à ce qui a été observé pour la géomembrane en bitume élastomère, est liée à la présence de fonctions oxydées, qui sont plus présentes dans la géomembrane en bitume oxydé que dans la géomembrane en bitume élastomère.

Le polymère actif est toujours présent dans la géomembrane en bitume élastomère après 15 ans en service.

Les résultats obtenus dans cette étude sur le comportement de la géomembrane en bitume oxydé sont cohérents avec les résultats obtenus précédemment dans la littérature et conduisent à la recommandation de ne pas laisser les géomembranes en bitume oxydé exposées sur site, ce qui peut être évité pour les géomembranes en bitume élastomère.

7. Références bibliographiques

- AFNOR (2004). NF P 84-204-1-2. DTU 43-1 – Travaux de bâtiments. Étanchéité des toitures terrasses et toitures inclinées avec éléments porteurs en maçonnerie en climat de plaine. Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux (CGM).
- AFNOR (2005). EN ISO 10318. Geosynthetics – Terms and definitions.
- AFNOR (2006). EN 14150. Geosynthetic barriers — Determination of permeability to liquids.
- Baldauf S., Tarnowski C., Weiss B. (2012). Long-term durability assessment: Evaluation of exposed HDPE geomembrane performance after 17 years in service in a water reservoir in Spain, *Eurogeo 5*, Valencia, Espana, 5: 57-61.
- Barroso M. (2005). Fluid migration through geomembrane seams and through the interface between geomembrane and geosynthetic clay liner, Ph.D. Thesis, Université Joseph Fourier de Grenoble (France) and University of Coimbra (Portugal), 215 p.

- Benchet R., Hérisson C., Gerbaud F., Croissant D., Grivaud S. (2013). Étude sur la durabilité des géomembranes en bitume élastomère exposées sur site depuis 6 à 30 ans. 9^{èmes} Rencontres Géosynthétiques, 9-11 avril 2013, Dijon, 395-404.
- Blanco A., Castillo F., Touze-Foltz N., Amat B., Aguiar, E. (2014). Behaviour of EPDM geomembrane 18 years after its installation in a water reservoir. *10th International Conference on Geosynthetics*, Berlin, 21-25 September 2014, 8 pages.
- Blanco M., Castillo F., Garcia F., Soriano J., Noval A., Touze-Foltz N., Pargada L., Rico G., Aguiar E. (2012a). Comparative study of three different kinds of geomembranes (PVC-P, HDPE, EPDM) used in the waterproofing of reservoirs. *Eurogeo 5*, Valencia, Espana, 2: 46-54.
- Blanco M., Leiro A., Soriano J., Crespo M., Zornberg J., Aguiar E. (2012b). Long-term performance of the "Laguna de Barlovento" reservoir waterproofing using a PVC-P geomembrane, *Eurogeo 5*, Valencia, Espana, 2: 55-63.
- Blanco M., Soriano J., Leiro A., Noval A., Aguiar E., Vara T., Rico G., Pargada L. (2012c). Twenty years monitoring the waterproofing of Barranco de Benijos reservoir, *Eurogeo 5*, Valencia, Espana, 2: 70-76.
- Blanco M., Castillo F., Garcia F., Soriano J., Noval A.M., Aguiar E. Vara T., Abad P. (2012d). Behaviour of EPDM geomembranes used in the waterproofing of reservoirs, *Eurogeo 5*, Valencia, Espana, 2: 39-45.
- Brulé B, Ramond G., Such C. (1987). Relations composition-structure-propriétés des bitumes routiers - État des recherches au LCPC, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 148 : 69-81.
- Bulletin officiel (2012). Cahier des clauses techniques générales. Fascicule 67-III. Étanchéité des ouvrages souterrains, 109 p.
- Durin L., Touze N., Duquennoi C. (1998). Water and organic solvents transport parameters in geomembranes. *4th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, Georgia, USA, 249-256.
- Eloy-Giorni C. (1993). Étude des transferts diffusifs dans les géomembranes : mécanismes et mesures à l'aide de traceurs radioactifs, PhD thesis, Université J. Fourier, Grenoble 1, CEA, France, 174p.
- Isacsson U., Lu X. (1999). Characterization of bitumens modified with SBS, EVA and EBA polymers, *Materials and Structures*, 28: 139-159.
- Korhonen M., Kellomäki A. (1996). Miscibilities of polymers in bitumen and tall oil pitch under different mixing conditions, *Fuel*, 75(15): 1727-1732.
- Lambert S., Touze-Foltz N. (2000). A test for measuring permeability of geomembranes, *Eurogeo 2*, Bologna, Italy, 10 p.
- Lesueur D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2): 42-82.
- Lu X., Isacsson U. (1998). Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens, *Fuel*, 77 (9-10): 961-972.
- Michalica P, Kazatchkov I.B., Jiri Stastna J., Ludo Zanzotto L. (2008). Relationship between chemical and rheological properties of two asphalts of different origins, *Fuel*, 87: 3247-3253.
- Mouillet V., Farcas F., Besson S. (2008). Ageing by UV radiation of an elastomer modified bitumen, *Fuel*, 87: 2408-2419.
- Mouillet V., Farcas F., Chailleux. E. (2011). Physico-chemical techniques applied to the study of polymer modified bitumen ageing, *Polymer modified bitumen-Properties and characterization*, T. McNally Ed., Woodhead Publishing Ltd, Cambridge) UK, 366-395.
- Pelte T. (1993). Étude théorique et expérimentale de la fonction étanchéité et du comportement thermique des géomembranes, Thèse de doctorat, Université J. Fourier, Grenoble 1, France, 253 p.
- Petersen J.C. (1984). Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 999: 13-30
- Touze-Foltz N. (2012). Performance of geosynthetics for environmental protection in landfills. Keynote Lecture, *Eurogeo 5*, Valencia, España, 0: 29-47.
- Touze-Foltz N., Croissant D., Farcas F., Royet P. (2010). Quantification of oxidized bituminous geomembranes ageing through hydraulic testing *9th International Conference on Geosynthetics*, Guarujá, Brazil, 753-756.

