

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR L'ÉTAT DE LA GÉOMEMBRANE PVC-P DU CHAMBON APRÈS 20 ANS D'EXPLOITATION ET DE SUIVI

FEEDBACK OF THE PVC-P GEOMEMBRANE OF THE CHAMBON DAM AFTER 20 YEARS OF OPERATION AND MONITORING

Olivier BORY ¹, François DELORME ¹, Jonathan TIREAU ², Frédéric TAILLADE ², Gabriella VASCHETTI ³

¹ EDF CIH, Le Bourget-du-lac, France

² EDF R&D, Moret-sur-Loing, France

³ CARPI TECH, Balerna, Suisse

RÉSUMÉ – La rénovation du barrage du Chambon a nécessité la dépose en 2013 de la géomembrane d'étanchéité amont en PVC-P posée dans les années 1990. À cette occasion, des échantillons ont été prélevés sur des zones à différentes expositions. Ces prélèvements ont été utilisés pour étudier le vieillissement en conditions réelles des géomembranes PVC-P exposées. Suite à ce retour d'expérience (REX), une réflexion est proposée pour le suivi du vieillissement des géomembranes PVC-P, la fin de vie de ces composants et les bonnes pratiques pour les futures réalisations. En seconde partie sont présentés les développements en cours pour disposer d'un outil non destructif permettant de suivre le vieillissement des géomembranes PVC-P.

Mots-clés : Géomembrane, PVC-P, retour d'expérience, vieillissement, outil capacitif.

ABSTRACT – The renovation of the Chambon dam in 2013 required to remove the upstream waterproofing geomembrane installed during the 1990ies. On this occasion, samples were taken from areas subject to different exposures. Tests have been performed on these samples to study ageing in real conditions of the exposed PVC-P geomembranes. After this feedback, a thought is suggested for the monitoring of the ageing of PVC-P geomembranes, the end of life of these elements, and recommendations for future project. The second part presents the research in progress to develop a non-destructive tool able to monitor the ageing of the PVC-P geomembranes.

Keywords: Geomembrane, PVC-P, feedback, ageing, capacitive tool.

1. Introduction

EDF-CIH a initié une réflexion en 2016, avec EDF R&D et CARPI, sur le vieillissement des géomembranes PVC-P. L'objectif est d'avoir une meilleure connaissance de l'état des géomembranes PVC-P du parc et une visibilité sur leur fin de vie. L'idée est de repousser le plus loin possible les opérations de remplacement et d'être en mesure de les programmer avec la meilleure anticipation possible.

La rénovation du barrage du Chambon a nécessité la dépose en 2013 de la géomembrane d'étanchéité amont en PVC-P posée entre 1991 et 1996. À cette occasion, 36 échantillons ont été prélevés sur des zones soumises à différentes expositions (UV, marnages, immersions...). Des essais ont été réalisés sur ces échantillons afin de :

- caractériser le vieillissement mécanique et physico-chimique de la géomembrane,
- évaluer l'influence de l'exposition aux UV et à l'eau sur la cinétique de vieillissement,
- vérifier la réparabilité de la géomembrane, et analyser la qualité des réparations,
- examiner la possibilité d'utiliser des outils non destructifs pour caractériser le vieillissement des géomembranes (infra-rouge et capacitif).

Cet article présente les résultats et les conclusions de ces essais. Une réflexion est ensuite proposée pour le suivi du vieillissement des géomembranes PVC-P, la fin de vie de ces composants, et les bonnes pratiques pour les futures réalisations. En seconde partie, sont présentés les développements en cours pour disposer d'un outil non destructif permettant de suivre in situ le vieillissement des géomembranes PVC-P.

2. Expertise de la géomembrane du Chambon déposée en 2013

2.1 Le barrage du Chambon

Le barrage du Chambon (Fig.1) est un ouvrage poids de classe A, d'une hauteur de 88 m au-dessus du terrain naturel et d'une longueur en crête de 294 m, construit entre 1929 et 1935. L'axe du barrage est rectiligne en rive droite et en zone centrale et courbe côté rive gauche. Le barrage est soumis à un phénomène d'alcali-réaction important. D'importants travaux de confortement ont été menés dans les années 1990. En particulier, une géomembrane d'étanchéité en PVC-P a été installée sur une quarantaine de mètres en partie supérieure du parement amont entre 1991 et 1996, (de l'ordre de 9100 m²), afin de limiter le risque de pressions interstitielles dans le barrage et restaurer l'étanchéité suite aux sciages verticaux amont-aval.

Un nouveau confortement de l'ouvrage a été réalisé en 2013-2014, consistant principalement à mettre en place des tirants horizontaux complétés par un filet en fibres de carbone en parement amont, et réaliser de nouveaux sciages verticaux amont-aval. Ces travaux ont nécessité la dépose complète en 2013 de la géomembrane d'étanchéité de 1991-1996, puis la pose d'une nouvelle géomembrane en 2014.

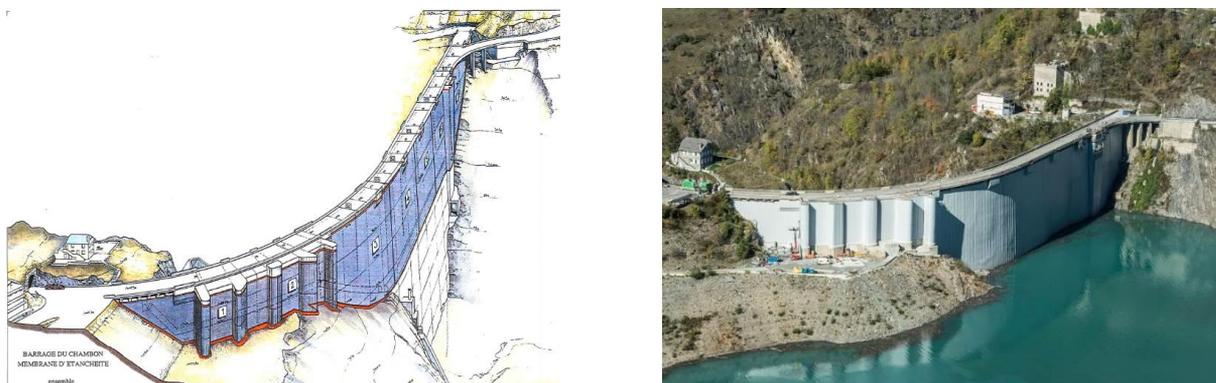


Figure 1. Géomembrane d'étanchéité amont sur le barrage du Chambon

2.2 Échantillons prélevés

Afin d'étudier l'état de l'ancienne géomembrane, 36 échantillons ont été prélevés à différentes positions (Figure 3), de taille 2 x 1,5 m environ. Ces échantillons diffèrent principalement par la date de pose, l'exposition aux UV et l'exposition au marnage (durée et charge d'eau).

Les matériaux SIBELON® utilisés pour les essais sont les suivants :

- CNT 2800 : géocomposite constitué d'une géomembrane PVC-P d'épaisseur initiale 2 mm thermo-soudée à un géotextile non tissé de 200 g/m² (utilisé en 1991 en zone 1) ;
- CNT 3750 : géocomposite constitué d'une géomembrane PVC-P d'épaisseur initiale 2,5 mm thermo-soudée à un géotextile non tissé de 500 g/m² (utilisé en 1993 (zone 2), 1994 (zones 2 et 3), 1995 (zone 4) et 1996 (zone 3) et au bassin de St Martin Vésubie en 2015) ;
- C 3250 : géomembrane PVC-P d'épaisseur 2,5 mm (utilisée au bassin de St Martin Vésubie en 2015).

2.3 Examen visuel et binoculaire

Dès réception, les échantillons de géomembrane ont fait l'objet d'un examen visuel suivi du prélèvement d'un morceau de la taille d'une feuille A4. L'examen visuel a révélé un jaunissement voire brunissement des zones exposées pour l'ensemble des géomembranes prélevées dans la zone 1. Parmi ces échantillons, les prélèvements correspondant à la partie supérieure du barrage (soit 1/1S, 1/2S et 1/3S) présentent tous des craquelures en surface visibles à l'œil nu. Sur les autres zones, hormis des traces/taches vraisemblablement liées à un dépôt de marnage, aucune dégradation n'a été observée.

Un examen complémentaire à l'aide d'une loupe binoculaire a été pratiqué sur les prélèvements de taille A4. Ces observations ont permis de classer les prélèvements en quatre classes en fonction de la morphologie de leur surface. La

Figure 2 donne un exemple illustrant l'état de surface pour chacune des classes identifiées et la

Figure 3 précise la localisation des différentes catégories de géomembrane sur un plan schématique de la face amont du barrage.

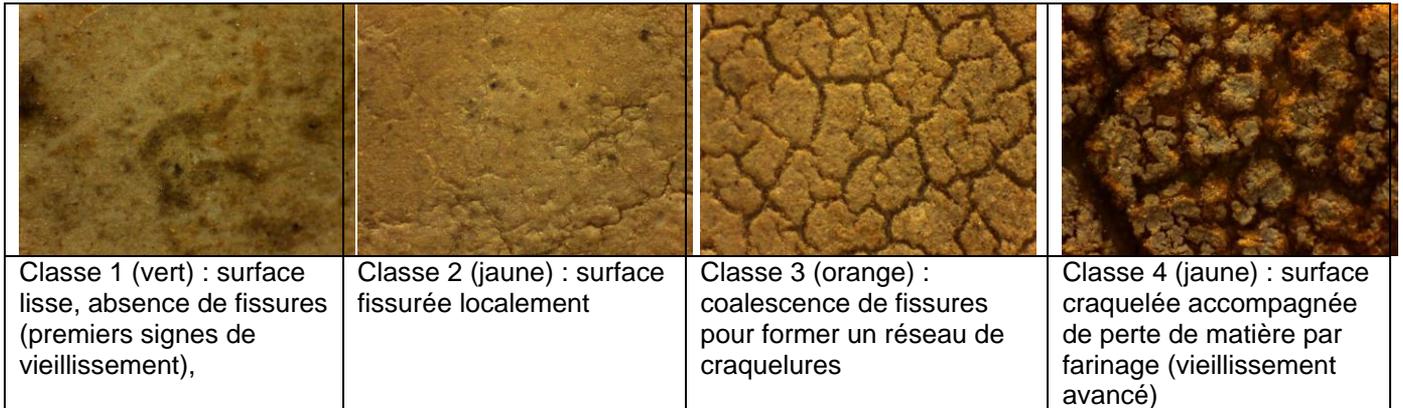


Figure 2. Illustration des quatre classes de dégradation. Photos obtenues à l'aide d'une loupe binoculaire (x35)

Les premières conclusions qu'il est possible de tirer de ces observations sont que :

- plus la durée d'exposition est longue, plus la dégradation en surface de la géomembrane est importante : la zone 1 qui a été exposée plus longtemps est plus dégradée que la zone 3A ou 4 ;
- les zones en partie supérieure les plus exposées aux UV sont plus dégradées que les zones en partie inférieure qui sont une partie de l'année sous l'eau.

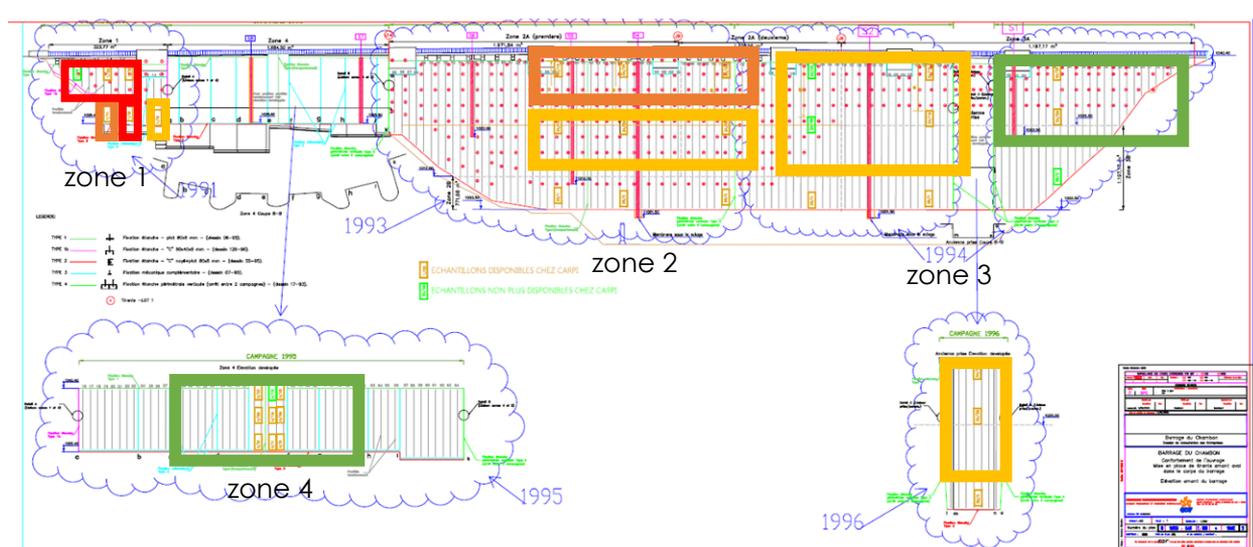


Figure 3. Vue de la géomembrane amont PVC-P du barrage du Chambon posée entre 1991 et 1996, des échantillons prélevés, et des observations visuelles par classe de dégradation

2.4 Mesure de l'épaisseur

Des mesures d'épaisseur de la géomembrane ont été réalisées en trois points sur l'ensemble des prélèvements, afin de les comparer aux valeurs initiales du fournisseur (2,5 mm pour CNT 3750 et 2,0 mm pour CNT 2800).

L'épaisseur de la géomembrane C 3250 neuve est de 2,5 mm, conformément aux caractéristiques fournisseurs.

Les résultats, résumés sur la Figure 4, révèlent des pertes d'épaisseur plutôt limitées (moins de 0,2 mm (8 %) de perte) dans le cas du CNT 3750 et des pertes plus significatives pour le CNT 2800 (de 0,3 à 0,6 mm (15 à 30 %) de perte) excepté pour le prélèvement 1/3L qui semble ne pas avoir subi de perte. Aucune tendance liée à l'exposition et au marnage n'apparaît clairement pour le CNT 3750. En revanche, pour le CNT 2800 (zone 1), les échantillons localisés en haut de l'ouvrage apparaissent plus touchés par la perte de matière. Ces constats rejoignent ceux du paragraphe précédent. Cette perte de matière peut provenir d'une fragilisation de la surface par perte de plastifiants et oxydation (s'accompagnant de coupures de chaînes) additionnée d'un phénomène de farinage et de décapage de la surface par le vent et l'eau.

Des mesures de masse surfacique ont été effectuées selon la norme NF EN 1849/2. Les résultats sont corrélés avec les mesures d'épaisseur.

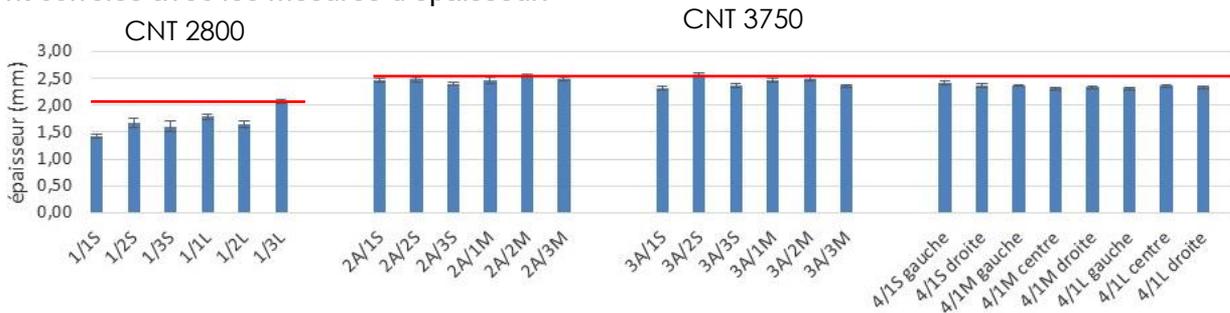


Figure 4. Épaisseur mesurée sur chaque prélèvement

2.5 Teneur en plastifiants

2.5.1 Identification des plastifiants

Après extraction des plastifiants, une analyse par spectroscopie infrarouge a été réalisée. Les plastifiants extraits du CNT 3750 et de la C 3250 sont identiques (spectres identiques, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), il s'agit de plastifiants de type phtalate. La société productrice de géomembranes confirme cette information et précise qu'il s'agirait d'un mélange de DIDP et de DOP (type de plastifiants) (le contrôle et la traçabilité des formulations des années 1990 n'ont pas permis de remonter à la composition d'origine).

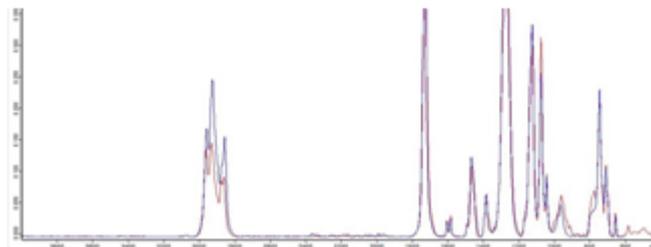


Figure 5. Spectres IR Infrarouge des plastifiants extraits de l'échantillon 2A/1M du CNT 3750 et de la C 3250 neuve.

2.5.2 Teneur résiduelle en plastifiants

La teneur en plastifiants initiale des géomembranes du Chambon CNT 3750 et CNT 2800 n'est pas connue. En effet, dans les années 1990, la société qui produisait elle-même ses géomembranes n'avait pas encore mis en place un contrôle et une traçabilité de la formulation de ces produits. Elle indique cependant que les taux de plastifiants utilisés étaient généralement autour de 30 – 32 %.

Pour cette étude, nous prendrons comme référence la valeur en plastifiants obtenue pour la géomembrane de Saint Martin de Vésubie du CNT 3750 de 2015. Afin de pouvoir comparer les résultats, toutes les mesures (Fig. 6) ci-dessous ont été réalisées au laboratoire R&D avec la méthode d'extracteur HPHT (haute pression et haute température) Buchi (à l'aide d'éther de pétrole pendant 3 min sur 1 g de matière à 100 °C et 100 bars).

Pour les zones 2, 3 et 4, les taux de plastifiants sont relativement homogènes. Ils sont légèrement plus importants pour les poses les plus récentes (1995 et 1996) que pour les plus anciennes (1993 et 1994).

Les différences entre les zones supérieures et inférieures ne sont pas franches et aucune tendance marquée ne se distingue. En considérant la référence du CNT 3750 de 2015, la perte de plastifiants serait de l'ordre de $5 \pm 2\%$ en masse en une vingtaine d'année. Cette homogénéité pourrait s'expliquer par la faible exposition aux UV, principal moteur de la perte en plastifiants, des zones 2, 3 (azimut inférieur à 106°) et 4 (azimut inférieur à 133° , mais masquée partiellement par les piles de l'évacuateur).

Pour la zone 1, les échantillons 1/1L et 1/3L se distinguent avec des taux de plastifiants proches de 30 %, alors que les autres échantillons présentent des taux autour de 20 %. Bien que l'azimut soit équivalent sur toute la zone 1 (autour de $160\text{-}170^\circ$, donc fortement exposé), les échantillons 1/1L et 1/3L reçoivent moins de rayonnement UV car masqués par le versant rive gauche du barrage (1/1L) ou la pile de l'évacuateur (1/3L), ce qui peut être une explication à cette observation. L'échantillon 1/2L en partie inférieure a passé plus de temps en immersion que les échantillons 1/1S, 1/2S et 1/3S, ce qui pourrait être la cause d'un taux de plastifiants plus élevé : 22 % contre 18 – 19 %. En conclusion, les parties non masquées de la zone 1 pourraient avoir subi une perte de plastifiant de l'ordre de 15 % en masse (soit une diminution de moitié par rapport au taux initial supposé).

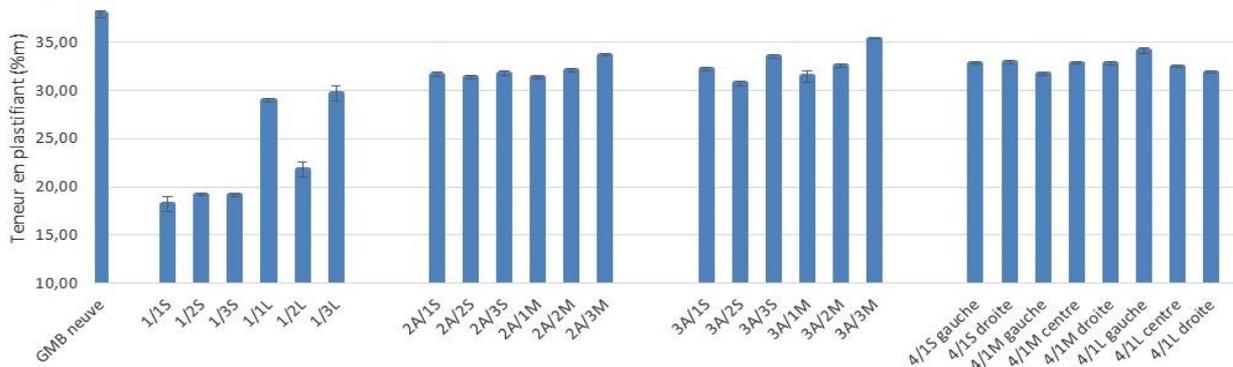


Figure 6. Taux de plastifiant mesuré sur chaque prélèvement par extracteur HPHT

La confrontation de ces résultats à ceux des observations à la loupe binoculaire est cohérente : les quatre échantillons ayant le taux de plastifiants de plus faible (1/1S, 1/2S, 1/1L, 1/2L) sont tous dans la classe 4.

Cette constatation confirme que la teneur en plastifiants est un bon indicateur de l'état de vieillissement d'une géomembrane PVC-P.

2.6 Propriétés mécaniques

Les essais de traction uniaxiale ont été réalisés sur des éprouvettes haltères de type H2 (sans le géotextile) selon la norme NF EN 60811-501. Les valeurs initiales des allongements à la rupture initiales des CNT 3750 et CNT 2800 des années 1990 ne sont malheureusement pas connues. Pour le CNT 3750, on utilisera comme référence le CNT 3750 neuf de 2015. La Figure 7 présente les résultats.

Pour les zones 2, 3 et 4, la baisse de l'allongement à la rupture serait de faible ($\epsilon_r \approx 350\%$) à modérée ($\epsilon_r \approx 225\%$). Concernant les échantillons de la zone 1, le manque d'information sur les propriétés mécaniques initiales rend délicate l'interprétation. Toutefois, en se basant sur les considérations du CST des câbles, précisant que le critère de fin de vie correspond à une valeur d'allongement à rupture de 50%, il apparaît que la géomembrane de la zone 1 localisée en tête de barrage présente des propriétés mécaniques très faibles. En pied de barrage, la géomembrane semble être moins affectée par les baisses de propriétés mécaniques ($150\% \leq \epsilon_r \leq 250\%$), encore une fois probablement parce que l'exposition solaire est plus faible (masque de la rive et de la pile de l'évacuateur), et une plus grande durée d'immersion.

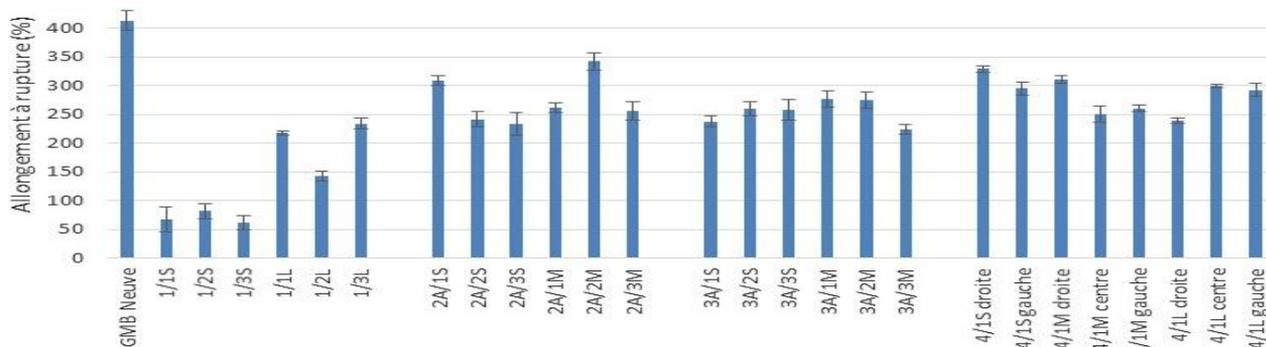


Figure 7. Allongement à la rupture des différents prélèvements et du CNT 3750 neuf

La

Figure 8, illustrant la corrélation entre l'allongement à rupture et la teneur en plastifiant, révèle que ces deux paramètres sont bien reliés. Ceci confirme notre intuition sur le fait que les baisses d'allongement à rupture sont principalement gouvernées par la perte en plastifiants.

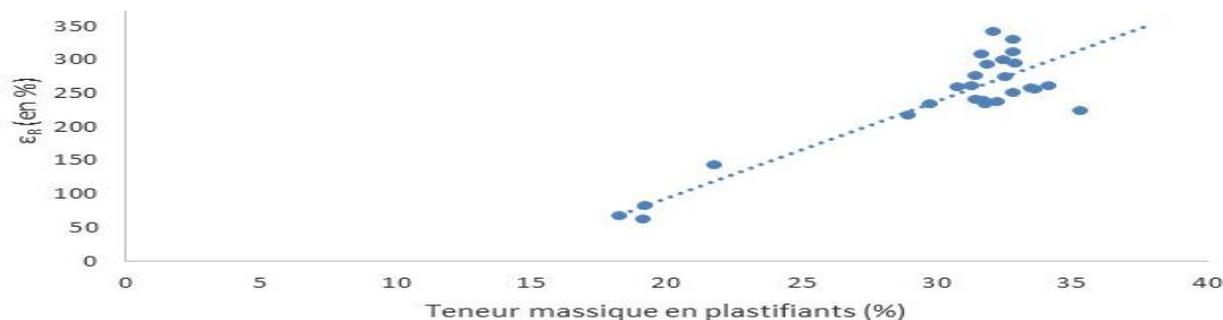


Figure 8. Corrélation entre les valeurs d'allongement à rupture et les teneurs en plastifiants.

2.7 Température de transition vitreuse T_g

La température de transition vitreuse T_g (Figure 9) définit l'état dans lequel la géomembrane sera pour une température donnée. Deux états sont à distinguer :

- état vitreux, rigide (pour $T < T_g$), où la géomembrane aura un comportement fragile,
- état flexible (pour $T > T_g$), où la géomembrane aura un comportement souple.

Ce paramètre est particulièrement intéressant pour les géomembranes d'étanchéité, puisque l'intégrité en dépendra. Un effort mécanique sur une géomembrane dans un état flexible aura pour conséquence un allongement élastique, ce qui, si l'on ne dépasse pas les limites, ne doit pas conduire à la rupture. En revanche un effort sur une géomembrane dans un état vitreux conduira plus rapidement à une rupture, puisque la limite élastique et la limite à la rupture seront nettement plus faibles.

La température de transition vitreuse T_g augmente avec la perte de plastifiants. La Figure 10 présente la corrélation obtenue lors de cette étude entre T_g et le taux de plastifiants.

La mesure de la flexibilité à froid, selon la norme UNI EN 495-5 permet d'avoir une estimation de T_g . Pour cette étude, le laboratoire R&D a utilisé une technique plus précise pour estimer ce paramètre : l'analyse mécanique dynamique (DMA). Les résultats sont présentés sur la Figure 9.

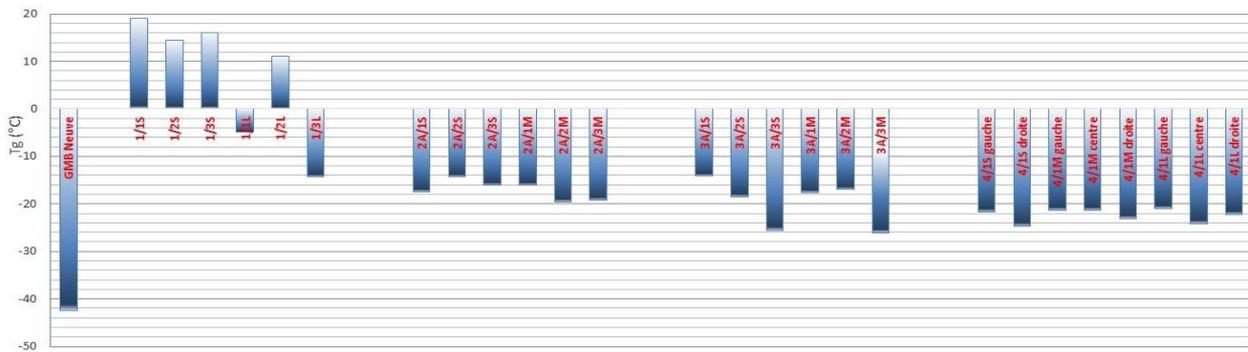


Figure 9. Températures de transition vitreuse T_g pour la géomembrane du Chambon déposée en 2013

Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

La température de transition vitreuse est nettement remontée sur l'ensemble de la géomembrane du Chambon déposée en 2013, si l'on considère comme référence l'échantillon neuf de CNT 3750 de 2015 où T_g est estimée à -42°C . En considérant une température minimale possible au Chambon de -15°C : la quasi-totalité du CNT 3750 conserve un état flexible sur les zones 2, 3 et 4, et le CNT 2800 de la zone 1 passe à l'état vitreux. Cet état ne veut pas dire que la géomembrane va systématiquement rompre, mais que la rupture sera plus rapidement atteinte avec une sollicitation mécanique (par exemple un marnage, poussée ou poids de la glace...).

La température de transition vitreuse T_g pourrait être un paramètre du critère de fin de vie d'une géomembrane. Par exemple si la rupture d'une géomembrane n'est pas acceptable pour des raisons de sûreté, il pourrait être spécifié par exemple que la fin de vie sera atteinte quand T_g sera supérieure à la température minimale possible sur l'ouvrage.

La bonne corrélation (Figure 10) entre T_g et le taux de plastifiants, montre une nouvelle fois l'intérêt de mesurer et suivre ce paramètre.

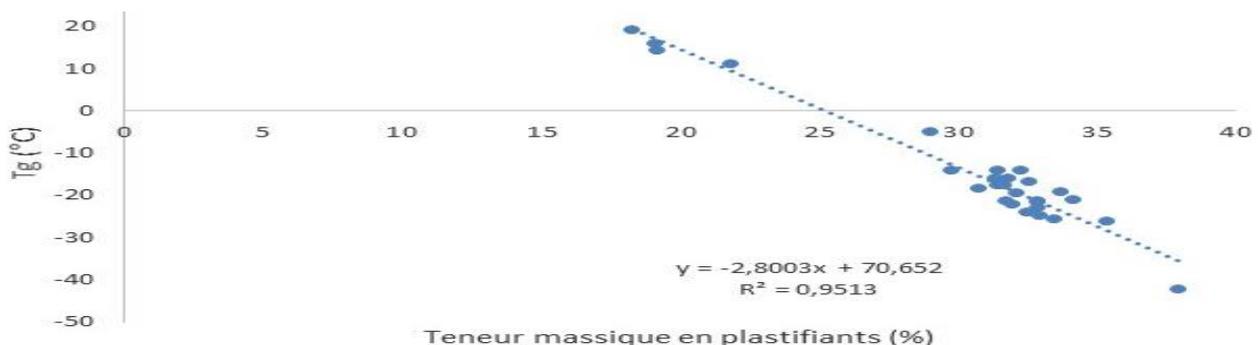


Figure 10. Corrélation entre température de transition vitreuse et teneur massique en plastifiants

2.8 Profil Infra-Rouge (IR)

L'analyse par spectroscopie infrarouge des prélèvements de géomembrane du Chambon a mis en évidence l'apparition de nouvelles fonctions chimiques (non présentes sur le CNT 3750 neuf) :

- de type O-H attribuées à un phénomène d'oxydation du PVC,
- de type C=C attribuées à un phénomène de déshydrochloruration, autrement dit de la perte de HCl et la formation de doubles liaisons carbone-carbone responsables du jaunissement du PVC.

La répétition de ces analyses sur toute la tranche de la géomembrane permet de réaliser un profil infrarouge et ainsi de révéler la présence et la profondeur des gradients d'oxydation et de déshydrochloruration.

Les figures 11 et 12 présentent respectivement les profondeurs d'oxydation et de déshydrochloruration mesurées sur l'ensemble des échantillons du Chambon. Les conclusions pouvant être tirées sont les suivantes :

- la quasi-totalité des échantillons analysés présentent des traces de déshydrochloruration en surface. Ce phénomène est observé plus en profondeur sur les échantillons de la zone 1. Cela

peut s'expliquer par une épaisseur initiale plus faible (2 mm contre 2,5 mm pour les autres zones) et une exposition plus forte et plus longue ;

- le phénomène d'oxydation semble affecter principalement la zone 1.

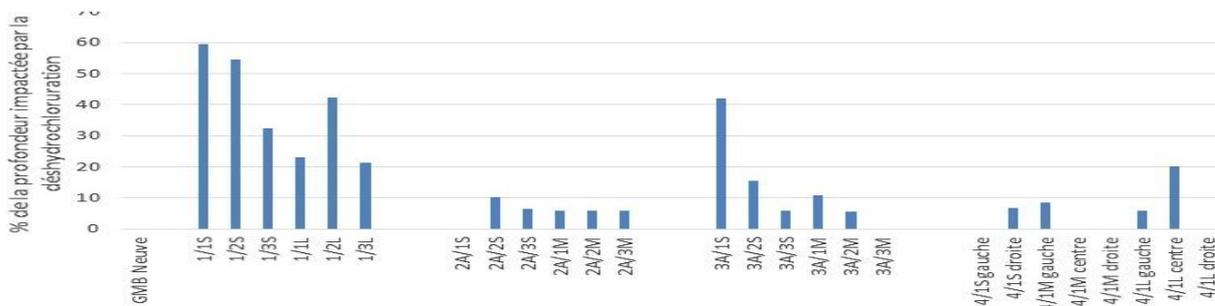


Figure 11. Synthèse de la profondeur impactée par la déshydrochloruration sur les échantillons prélevés

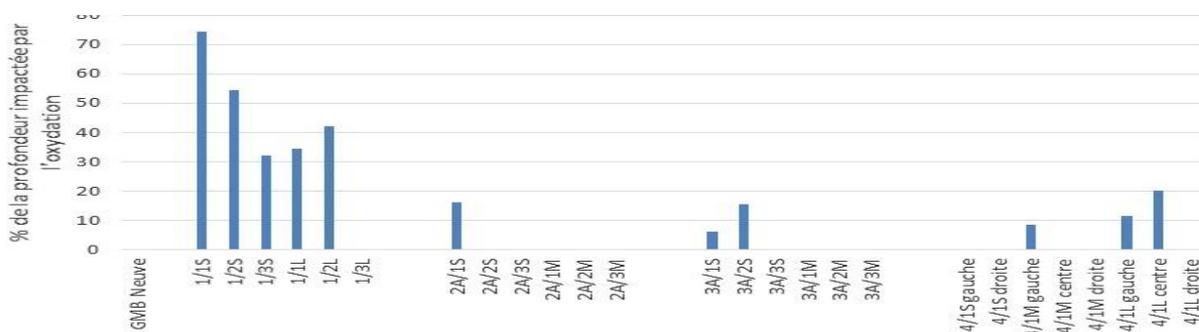


Figure 12. Synthèse de la profondeur impactée par l'oxydation sur les échantillons prélevés

2.9 Temps d'induction à la déshydrochloruration TIDC

La mesure du temps d'induction à la déshydrochloruration (TIDC) permet d'estimer la teneur résiduelle en stabilisant thermique.

On observe sur la Figure 13 une différence importante entre la teneur du CNT 3750 neuf et des échantillons de CNT 3750 des zones 2, 3, 4 ainsi que de ceux de CNT 2800 de la zone 1. Il semblerait que ces agents aient été largement consommés pour les zones 2, 3 et 4, voire même totalement pour la zone 1 (excepté encore pour la zone 1/3L qui est moins exposée).

Cette consommation avancée pour tous les échantillons expliquerait pourquoi le phénomène de dégradation par déshydrochloruration est observé sur la quasi-totalité des géomembrane côté externe.

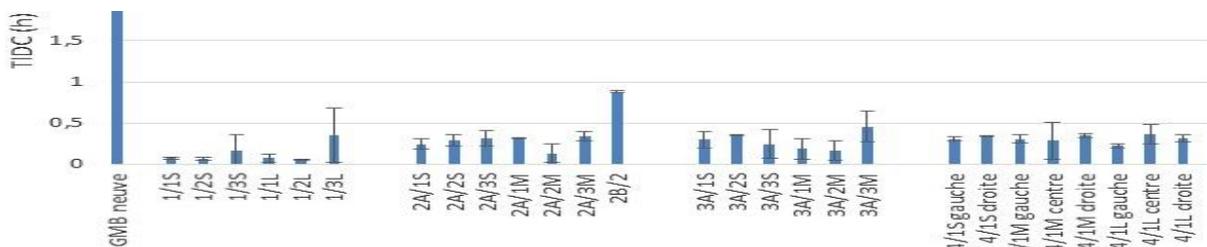


Figure 13. Valeurs des temps d'induction à l'oxydation obtenues pour les différents échantillons

2.10 Réparabilité

2.10.1 Protocole suivi

Afin d'étudier la réparabilité du géocomposite du Chambon, des soudures avec une géomembrane neuve (C 3250 de St Martin de Vésubie) ont été effectuées sur plusieurs échantillons. Ces soudures ont été testées à la traction (essai de pelage) et au cisaillement (essai de cisaillement) sur des éprouvettes rectangulaires de 19,5 cm x 5 cm.

Le protocole de soudure a été déterminé pour correspondre au mieux à une réparation réelle que l'on effectuerait sur site. Deux types de soudure ont été réalisés et testés :

- Soudure de la géomembrane C 3250 neuve sur un échantillon du Chambon (CNT 3750 et CNT 2800), face exposée, après ponçage prononcé ;
- Soudure de la géomembrane C 3250 neuve sur un échantillon du Chambon (CNT 3750 et CNT 2800), face non exposée, après retrait du géotextile, et ponçage léger.

Les soudures ont été réalisées manuellement avec une roulette et un poste Leister TRIAC, avec des soudeurs expérimentés de la société qui fournit les géomembranes.

Afin de servir de référence, une soudure a été réalisée entre deux géomembranes C 3250 neuve, avec le robot Leister TWINNY.

2.10.2 Essai de pelage

L'essai (EN 12316-2) consiste à soumettre une soudure à un effort de traction jusqu'à la rupture. Les résultats sont présentés sur la Figure 14.

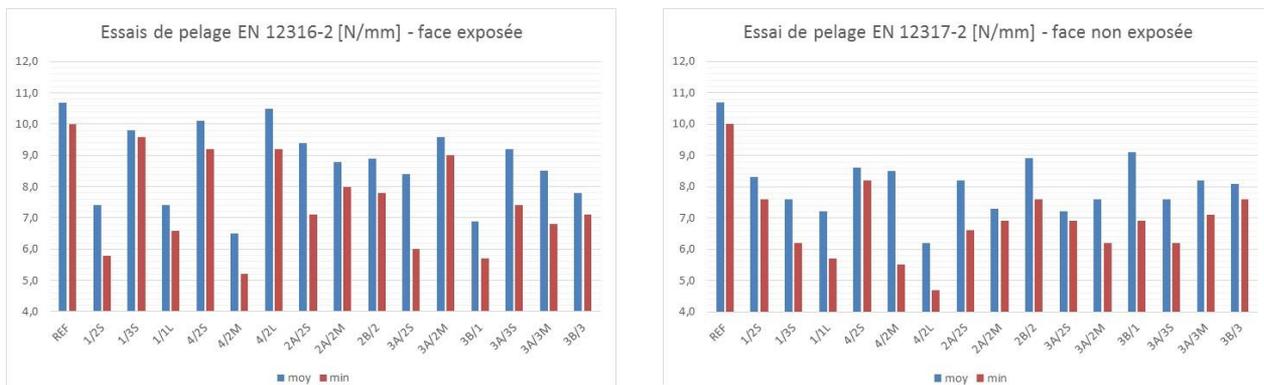


Figure 14. Résultats des essais de pelage EN 12316-2 [N/mm]

Les recommandations du Comité Français des Géosynthétiques, reprises par la certification ASQUAL des soudeurs, préconisent que les soudures réalisées doivent avoir une résistance au pelage minimale de 6 N/mm en moyenne, et aucune valeur en dessous de 5 N/mm (pour les géomembrane PVC-P d'épaisseur > 2 mm).

Les conclusions que l'on peut tirer sont les suivantes :

- pratiquement toutes les soudures respectent le critère de l'ASQUAL : toutes les soudures ont une résistance moyenne sur cinq essais supérieure à 6 N/mm, et aucune valeur n'est en dessous de 5 N/mm (sauf un échantillon 4/2L qui était légèrement en dessous de la limite : 4,7 N/mm). En atelier et avec des soudeurs expérimentés, on peut conclure que les géocomposites du Chambon avec du CNT 2800 ou CNT 3750 sont réparables après une vingtaine d'année de service. Néanmoins, sur site avec des accès difficiles et sur des géométries parfois complexes, il est probable que de tels résultats sont plus difficiles à obtenir. Il est à souligner que l'expérience du soudeur est primordiale pour réaliser ces réparations, où une part importante du succès tient au ressenti et au toucher de l'opérateur. Le ponçage prononcé réalisé sur la face exposée à la disqueuse est très délicat et conduit à enlever une grande partie de l'épaisseur initiale de la géomembrane ;
- par rapport à la soudure de référence géomembrane C 3250 neuve sur C 3250 neuve, la baisse de résistance est de 2 à 53 % pour les zones 2, 3 et 4 ;
- aucune tendance nette ne se dégage entre les résistances au pelage des soudures sur la face exposée et sur la face non exposée.

2.10.3 Essai de cisaillement

L'essai (EN 12317-2) consiste à soumettre une soudure à un effort de cisaillement jusqu'à la rupture. Les résultats sont présentés sur la Figure 15.



Figure 15. Résultats des essais de cisaillement EN 12317-2 [N/mm]

Les conclusions que l'on peut tirer sont les suivantes :

- par rapport à la soudure de référence géomembrane C 3250 neuve sur C 3250 neuve, la baisse de résistance est de 9 à 32 % pour les zones 2, 3 et 4 ;
- pour l'échantillon 1/2S très dégradé, la résistance au cisaillement de la face non exposée est nettement meilleure que pour la face exposée.

2.11 Conclusion sur l'état de la géomembrane du Chambon après 20 ans d'exploitation

La géomembrane présente des signes avancés de vieillissement sur la zone 1 :

- un état de surface fortement endommagé, avec présence du phénomène de « farinage »,
- des pertes d'épaisseur et de masse surfacique importantes,
- une baisse significative de la teneur en plastifiants,
- des propriétés mécaniques faibles,
- un état vitreux fragile pour des températures courantes en hiver,
- des chaînes polymères oxydées et déshydrochlorées sur une part importante de l'épaisseur de la géomembrane,
- un taux résiduel de stabilisants thermiques faible voire nul.

Malgré tout, la géomembrane en zone 1 accomplissait encore correctement sa fonction d'étanchéité au moment de sa dépose, et la possibilité de réaliser des réparations de qualité a été démontrée en atelier.

La géomembrane en zone 1, si elle n'avait pas été déposée en 2013, aurait vraisemblablement accompli encore un certain temps sa fonction d'étanchéité, mais sa rupture aurait été de plus en plus probable lors des périodes froides, et les réparations de plus en plus difficiles.

La géomembrane présente des signes légers de vieillissement sur les zones 2, 3 et 4 :

- un état de surface proche de l'état initial,
- des faibles diminutions d'épaisseur et de masse surfacique,
- des baisses raisonnables de la teneur en plastifiants,
- des propriétés mécaniques diminuées mais encore satisfaisantes,
- un état flexible même lors des hivers rigoureux,
- des chaînes polymères oxydées et déshydrochlorées essentiellement sur la surface exposée de la géomembrane,
- un taux résiduel de stabilisants thermique faible.

La géomembrane accomplissait correctement sa fonction d'étanchéité au moment de sa dépose, et les réparations étaient possibles.

La géomembrane en zone 2, 3 et 4, si elle n'avait pas été déposée en 2013, aurait vraisemblablement accompli sa fonction d'étanchéité avec succès encore plusieurs années. Une mesure régulière du taux de plastifiant aurait permis d'estimer la cinétique de pertes de plastifiants sur ce site, et de disposer d'une visibilité sur la fin de vie.

Analyse :

La différence d'état entre la zone 1 d'une part et les zones 2, 3, 4 d'autre part s'explique :

- par le fait que la géomembrane plus fine (2 mm) a été installée en zone 1 alors qu'une géomembrane de 2,5 mm a été installée sur les zones 2, 3 et 4. Une géomembrane plus fine présente un réservoir en plastifiants plus faible et est donc plus sensible au vieillissement ;
- par le fait que la zone 1 correspond historiquement à la première zone revêtue et donc la zone pour laquelle les durées d'exposition les plus longues sont enregistrées ;
- par le fait que la zone 1 est plus exposée aux UV que les autres zones, car orientée plus vers le sud.

Une différence de composition chimique initiale est également possible, mais nous n'en avons malheureusement pas connaissance. Les essais réalisés en 2017 n'ont pas révélé de différence.

L'influence de l'exposition aux UV est flagrante. L'influence du marnage et de l'exposition à l'eau n'a pas été clairement observée sur cette géomembrane. La perte de plastifiants par dissolution est vraisemblablement d'un second ordre par rapport à l'évaporation, surtout sur les zones exposées aux UV. De plus, l'immersion permet d'apporter une protection aux UV. Dans le cas du Chambon, la zone 1 en partie haute du barrage ne présente pas de grandes différences d'exposition à l'eau. Pour les zones 2, 3 et 4, l'exposition à l'eau est très différente entre le haut et le bas de la géomembrane, mais l'exposition UV est faible à cause de l'orientation.

Les essais ont montré le lien et la bonne corrélation entre le taux de plastifiants et la plupart des propriétés de la géomembrane. Celui-ci diminue avec le temps (par évaporation dans l'air ou dissolution dans l'eau), avec une cinétique accélérée par les UV. Ces premières corrélations pourront être affinées lors des prochaines études, comme la Girotte en 2018.

La dégradation de l'état de surface peut être attribuée : (i) pour une part importante, à la création d'une peau fragile suite à la perte importante de plastifiants en surface, (ii) pour une moindre part, aux coupures de chaînes en surface causées par l'oxydation des macromolécules du PVC. Enfin le

jaunissement/brunissement de surface est, quant à lui, attribué au phénomène de déshydrochloruration se produisant sous l'effet de la température et/ou d'un rayonnement après consommation de la majorité des stabilisants thermiques introduits initialement au moment de la mise en œuvre de la géomembrane.

3. Développement d'un outil non destructif pour le suivi du vieillissement des géomembranes PVC-P

Le taux de plastifiants est certainement le meilleur paramètre pour suivre le vieillissement des géomembranes PVC-P, puisque de nombreuses propriétés essentielles lui sont directement reliées. Seulement sa détermination par les moyens classiques est contraignante : il faut en effet prélever des échantillons, ce qui peut poser problème lorsqu'aucun témoin de vieillissement n'est disponible sur l'ouvrage. Le centre R&D étudie des solutions non destructives pour mesurer in situ le taux de plastifiants, qui permettraient de dresser et suivre l'état des nombreuses géomembranes PVC-P exposées du parc.

La spectroscopie infrarouge portable a d'abord été envisagée. Si cette technique semble effectivement capable de doser les plastifiants, elle a été abandonnée car elle ne permet d'obtenir une information que sur les premiers micromètres (< 500 µm) en surface.

Les mesures capacitives, dont l'outil a fait l'objet d'un brevet, ont ensuite été testées, et les premiers résultats se sont avérés convaincants (Figure 16), puisqu'une corrélation semble exister entre la permittivité diélectrique et le taux de plastifiants. La permittivité diélectrique, qui est une mesure macroscopique (à l'échelle de la géomembrane), est sensible aux propriétés microscopiques des matériaux constituant l'échantillon.

Des essais complémentaires en 2018 permettront de conforter ces premiers résultats et, le cas échéant, l'identification d'une droite de calibration entre les permittivités et la teneur en plastifiants des géomembranes.

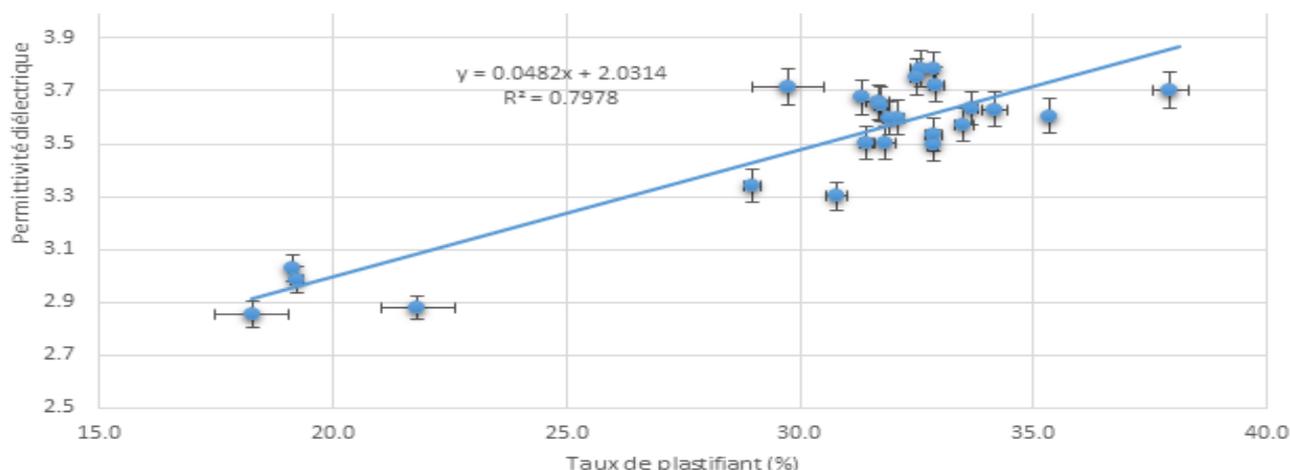


Figure 16. Corrélation entre permittivité et teneur en plastifiants

4. Conclusion sur le suivi du vieillissement des géomembranes PVC-P

Indicateur de vieillissement des géomembranes PVC-P

L'étude sur la géomembrane du Chambon a confirmé l'intérêt de mesurer la teneur en plastifiants pour suivre l'état des géomembranes PVC-P. Les principales propriétés : allongement à la rupture, température de transition vitreuse, possibilité d'effectuer des réparations, sont directement liées et corrélées à ce paramètre. La teneur en plastifiants diminue avec le temps, avec une cinétique qui dépend de la qualité initiale du produit (épaisseur et composition chimique) et des conditions de site (exposition aux UV, à l'eau et température).

Une méthode non destructive semble prometteuse pour suivre ce paramètre : les mesures capacitives. Les premiers résultats montrent un lien avec la mesure de la permittivité. Des développements seront effectués en 2018 pour confirmer la possibilité d'utiliser cette technique et calibrer son utilisation.

Réflexions sur les critères de fin de vie

Il serait trop présomptueux de définir un critère de fin de vie unique applicable à toutes les utilisations des géomembranes PVC-P pour les ouvrages hydrauliques. Les conséquences d'une rupture d'une géomembrane d'étanchéité sont très différentes d'un ouvrage à l'autre. Dans certains cas, la rupture de l'étanchéité conduirait à des problématiques de sûreté ou économiques. Pour limiter ces risques, il conviendrait alors de remplacer la géomembrane avant que sa probabilité de défaillance ne soit trop importante. En revanche pour d'autres cas, une rupture de l'étanchéité n'aurait pas (ou peu) d'impact, et il pourrait être acceptable d'aller jusqu'à la rupture, voire de vivre avec.

Le critère de fin de vie d'une géomembrane doit par conséquent être adapté aux enjeux de chaque ouvrage, à l'origine du besoin de la géomembrane et à ses conditions de site. Les paramètres suivants peuvent être utilisés pour élaborer le critère :

- température de transition vitreuse T_g , qui devrait rester inférieure à la température minimale du site,
- possibilité d'effectuer des réparations par soudure,
- allongement à la rupture minimal (par exemple 50 ou 100 %).

Ces paramètres sont tous corrélés au taux de plastifiants, donc il pourrait être défini un taux minimal de plastifiants en dessous duquel un ou plusieurs paramètres n'est (ne sont) pas vérifié(s).

Réflexions et bonnes pratiques pour les futures réalisations

Afin de viser une durabilité maximale et un meilleur suivi des applications de géomembranes PVC-P, les pistes suivantes peuvent être utilisées pour les futures réalisations :

- la durée de vie d'une géomembrane PVC-P dépend directement de son épaisseur initiale. Plus la géomembrane sera épaisse, plus la perte de plastifiants sera lente à cœur, l'effet de réservoir important, et plus les propriétés de la géomembrane seront conservées ainsi que la possibilité de faire des réparations de qualité. Une géomembrane de 2 mm d'épaisseur exposée aux UV risque d'avoir une durée de vie d'une vingtaine d'année à peine. 2,5 mm semble être un minimum pour garantir une durée de vie supérieure. 3 mm est maintenant le nouveau standard utilisé par l'entreprise productrice de géomembranes, même si cette entreprise a déjà mis en œuvre des géomembranes jusqu'à 4 mm ;

- la composition chimique (plastifiants, stabilisants, ...) du PVC-P est également primordiale pour sa durabilité. En particulier, pour être stables dans la durée, les plastifiants doivent avoir un poids moléculaire minimum. Toutes les formules de PVC-P ne se valent pas. Les utilisations exposées sur les barrages, où la durée de vie demandée est souvent de plusieurs décennies, sont les formulations haut de gamme des producteurs de PVC-P, et ne représentent qu'une toute petite partie de la production. Il n'est parfois pas économiquement possible de produire ces produits pour de petites séries. Ces produits sont bien plus techniques et coûteux que ceux couramment utilisés pour les petits bassins de rétention d'eau, les piscines, où la durée de vie visée est plutôt proche de la dizaine d'année ;

- mettre en place des témoins de vieillissement sur la géomembrane, sur plusieurs zones correspondant à plusieurs expositions. Les témoins de vieillissement sont simples et peu coûteux à mettre en place : il s'agit d'un morceau de géomembrane PVC-P, de taille d'au moins 50 cm x 50 cm, soudé directement sur la géomembrane exposée en place, avec un géotextile entre les deux. Ces témoins permettent de prélever plus tard sans la percer des échantillons représentatifs de l'état de la géomembrane, et donc sans avoir besoin d'effectuer une réparation qui deviendra de plus en plus difficile à réaliser avec le temps. Cette approche est à présent suivie sur plusieurs barrages depuis 2014.

5. Références bibliographiques

- Benhabiles K. (1992). Rapport bibliographique : le PVC pour câbles, ses plastifiants et les problèmes liés à la compatibilité avec le PVC, ENSAM/SERAM.
- Benneton J.P. (2007). Séminaire sur la durabilité des géosynthétiques - Retour d'expérience et évaluation en laboratoire des produits, cas des géomembranes en polychlorure de vinyle plastifiés (PVC-P).
- Navick M. (1987). Le PVC comme matériau de câbles – synthèse bibliographique Document interne EDF DER, HM62-5533, 1987
- Chulliat O., Pons E. (2014). Confortement du barrage du Chambon, COGECH 2014.