

# ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT D'UNE GÉOMEMBRANE EXPOSÉE PENDANT 26 ANS

## AGEING STUDY OF AN EXPOSED GEOMEMBRANE AFTER 26 YEARS

Thierry CHASSAGNAC<sup>1</sup>, Matthieu CAO-THANH<sup>2</sup>

1 3C, Lyon, France

2 TOTAL, Paris, France

**RÉSUMÉ** – Pour vérifier le bon état fonctionnel d'un site de confinement, les auteurs ont fait réaliser un programme d'essais permettant d'appréhender l'état de vieillissement de la géomembrane (GMB). En Polyéthylène Haute Densité (PEHD) de 1,5mm, cette GMB est exposée depuis sa mise en place en 1993. Les paramètres sélectionnés : paramètres dimensionnels et mécaniques, temps d'induction de l'oxydation (TIO), température de fusion, cristallinité, fonctions chimiques) montrent qu'une oxydation plus ou moins prononcée affecte la GMB selon les conditions d'exposition, modifiant significativement certains paramètres. À cette date, les parties les plus significativement oxydées conservent des caractéristiques mécaniques satisfaisantes pour assurer le bon état fonctionnel du site. L'article montre que les soudures sont un point faible des ouvrages de confinement en GMB.

Mots-clés : géomembrane (GMB), vieillissement, Temps d'Induction à l'Oxydation (TIO), cristallinité, traction.

**ABSTRACT** – In order to verify the good functional state of a sealed site, the authors carried out a test program to assess the state of aging of the geomembrane (GMB). This GMB, in 1.5mm HDPE and installed in 1993, was exposed since its installation. The selected parameters (dimensional, mechanical, OIT, melting temperature, crystallinity, chemical functions) show that a more or less oxidation level affects the GMB depending on the exposure conditions, significantly modifying certain parameters. At this date, the more oxidized parts retain satisfactory mechanical characteristics to ensure the good functional condition of the site. The article shows that the weldings are a weak point of GMB containment

Keywords: Geomembrane(GMB), ageing, Oxidation Induction Time (OIT), crystallinity, tensile strength.

### 1. Introduction

À la suite de l'exploitation d'une installation de stockage de déchets localisée en Haute-Vienne, un complexe d'étanchéité a été installé en couverture des déchets en 1993. La géomembrane en PEHD d'épaisseur 1,5 mm qui compose ce complexe n'a pas été recouverte de matériaux de couverture comme il est généralement l'usage, et elle est ainsi restée exposée aux conditions climatiques jusqu'à aujourd'hui.

La géomembrane utilisée sur ce site est donc exposée aux UV, aux changements importants et quotidiens de température, et potentiellement soumise à une influence chimique des déchets sous-jacents. La géomembrane étudiée, âgée de 26 ans, apparaît globalement et visuellement peu altérée et les auteurs ont souhaité analyser certaines caractéristiques physiques de celle-ci afin de vérifier si le bon état général constaté s'accompagne d'une persistance de certaines caractéristiques physico-chimiques et mécaniques.

La durée de vie d'une géomembrane reste discutée, mais en condition exposée, certains auteurs l'estiment à plus de 36 ans (Koerner et al., 2005) sur la base d'un modèle de vieillissement en 3 stades (fig.1) et d'un critère de perte de 50% (demi-vie) de ses caractéristiques mécaniques. L'intérêt qui apparaît également dans la caractérisation de ce site de 26 ans d'âge est qu'il pourrait présager de l'état d'un ouvrage enfoui (non exposé) beaucoup plus âgé (>400 ans selon le même modèle).

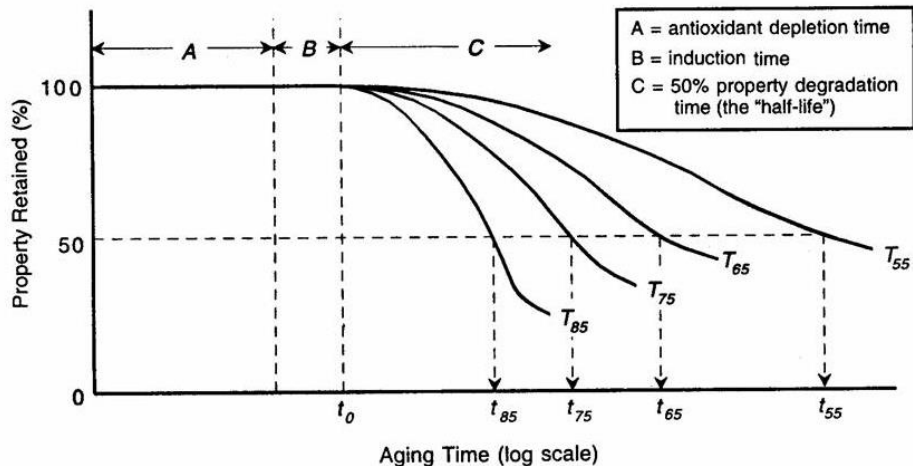


Figure 1. Les 3 stades de vieillissement des GMB (Koerner, 2005)

## 2. Site d'étude et méthodes de prélèvement et d'essai

### 2.1. Site et prélèvements

Le site occupe une ancienne carrière d'argile implantée en zone rurale, dans laquelle divers déchets d'origine industrielle ont été stockés. Le confinement de surface, objet de cet article, est constitué d'une géomembrane PEHD 1.5mm, reposant sur un géotextile anti-poinçonnement, lui-même déposé sur les déchets, dont la partie supérieure a été profilée pour éviter les points bas et débarrassée des éléments poinçonnant. Comme le montre la figure 2, le complexe est globalement peu penté, ce qui induit des faibles contraintes mécaniques effectives permanentes sur la GMB, excepté sur une zone longeant un canal à l'aval du site.



Figure 2. Vue générale du site

Toutes les soudures entre lés ont été contrôlées et les recommandations du CFG (fascicule n°10) ont été suivies lors de la pose. Il avait été fait le choix de ne pas recouvrir la GMB, de façon à pouvoir mieux la contrôler visuellement. Malgré la position de la GMB en contrebas par rapport aux terrains voisins, qui met le site dans une configuration peu soumise au vent, un lestage par sac de sable ou bastaings a été mis en place. La surface est de l'ordre de 8000 m<sup>2</sup>.

Le climat est de type océanique (selon classification de Köppen) avec une température ambiante moyenne de 12,0°C (mensuelle minimale 4,6°C, mensuelle maximale 19,6°C) et des précipitations moyennes de 875 mm. La GMB subit des forts écarts de température entre la nuit (température proche de la température de l'air ambiant) et le jour, lorsque le soleil l'échauffe.

Pour éviter l'altération du complexe d'étanchéité, le prélèvement d'échantillons de la géomembrane a été effectué de façon non destructive, c'est-à-dire à des endroits non sensibles où la géomembrane était présente en excès (Fig. 3), ou sur les bords libres des soudures (Fig. 4). Chaque échantillon est caractérisé (Tab. 4) et dûment repéré et orienté, pour vérifier si certaines conditions d'exposition (ombre, sous-face géomembrane) ont des influences sur le vieillissement.



Figure 3. Mode de gisement échantillon 210ECH19

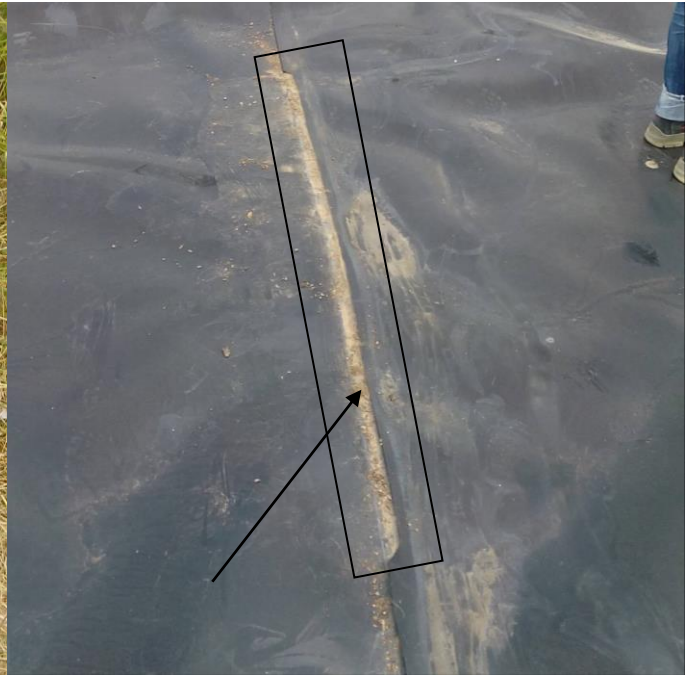


Figure 4. Mode de gisement échantillons 205 à 209ECH19

Tableau 1. Mode de gisement des prélèvements

Code échantillon	Localisation	Taille échantillon	Pendage du plan de la GMB	facteurs d'exposition au vieillissement		
				Proximité soudure	Exposition solaire	Exposition / volatils
205ECH19	Partie libre le long de la soudure (Lé 1)	4 cm*500 cm	N340°O, 4°S	oui	forte	non
206ECH19	Partie libre le long de la soudure (Prélèvement 1 du Lé 2)	4 cm*130cm	N340°O, 4°S	oui	forte	non
207ECH19	Partie libre le long de la soudure (Prélèvement 2 du Lé 2)	4 cm*180 cm	N340°O, 4°S	oui	forte	non
208ECH19	Partie libre le long de la soudure (Prélèvement 3 du Lé 2)	4 cm*170 cm	N340°O, 4°S	oui	forte	non
209ECH19	Partie libre le long de la soudure (Lé 3)	4 cm*380 cm	N340°O, 4°S	oui	forte	non
210ECH19	Extrémité de GMB prélevée au sommet de talus sud présentant une partie enterrée et une autre non recouverte	35 cm*50 cm	N20°O, 30°N	non	moyenne/nulle	Nulle/ potentielle

## 2.2. Objectifs et principe des essais sur géomembrane

Le programme de caractérisation a porté à la fois sur des analyses physico-chimiques proposées et réalisées par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des réseaux (IFSTTAR) et sur une caractérisation dimensionnelle et fonctionnelle réalisée par l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA).

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées selon le programme expérimental suivant :

- analyse chimique par spectrométrie Infrarouge à Transformée de Fourier en mode Réflexion Totale Atténuée (IRTF-ATR) afin de caractériser l'état d'oxydation de la surface des échantillons ;
- analyse thermique par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) sous gaz inerte afin de déterminer le taux de cristallinité et la température de fusion du polymère ;
- analyse thermique par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) afin de déterminer le temps d'induction à l'oxydation (TIO) des échantillons suivant la norme ISO 11357-6.

Les essais de caractérisations dimensionnelles et fonctionnelles ont été réalisés selon le programme expérimental suivant :

- détermination de l'épaisseur selon une adaptation de la norme NF EN 1849-2 ;
- masse surfacique selon une adaptation de la norme NF EN 1849-2 ;
- essai de traction unidirectionnelle selon la norme NF EN 12311-2.

### 2.2.1. Essais physico-chimiques

#### - Analyse chimique par spectrométrie IRTF-ATR

L'objectif de cette analyse est de déterminer d'éventuelles modifications chimiques induites par le vieillissement de la géomembrane. La spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet, via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons entre deux atomes, d'identifier les fonctions chimiques et par suite de différencier les fonctions associées au matériau originel de celle d'un matériau oxydé telles que présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Attribution des principales bandes d'absorption présentes sur les spectres IRTF-ATR des échantillons de GMB prélevées sur le site

Nombres d'ondes (cm <sup>-1</sup> )	Fonctions chimiques		Attributions
3384	OH	hydroxyle	Produit d'oxydation
2915 et 2847	CH <sub>2</sub>	Ethyle	PEHD
1714	C = O	ester	Produit d'oxydation
1472 et 1462	CH <sub>2</sub>	Ethyle	PEHD
1170	C-O	éther de l'ester	Produit d'oxydation
1035	C-O	ether	Produit d'oxydation
730 et 718	(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> (n > 4)	Ethyle des chaînes hydrocarbonées	PEHD

La profondeur de pénétration du faisceau infrarouge dans l'échantillon dépend de la longueur d'onde et du cristal utilisé. Elle est comprise entre 0,6 et 2,7 µm pour ces analyses.

#### - Analyse thermique par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)

Le polyéthylène est un polymère semi-cristallin qui présente habituellement un comportement ductile. L'objectif de cette analyse est de déterminer la proportion de phase cristalline et de phase amorphe, cette dernière est responsable du caractère déformable du matériau et diminue avec le temps.

Les mesures sont réalisées par calorimétrie différentielle à balayage (DSC). La cristallinité est fonction de l'enthalpie de fusion évaluée à partir de l'aire sous les pics de fusion de la façon illustrée sur la figure 5.

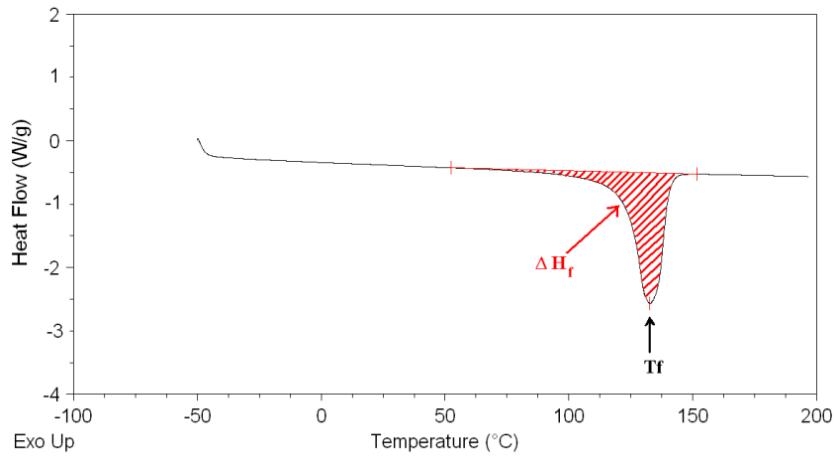


Figure 5. Méthode de détermination de l'enthalpie et de la température de fusion sur un thermogramme de DSC

La température de fusion est la température à laquelle la phase cristalline fusionne, c'est-à-dire se désorganise et devient amorphe. Cette température est d'autant plus élevée que la taille des cristaux est importante.

Le même appareillage est utilisé en vue de déterminer le Temps d'Induction à l'Oxydation (TIO). L'objectif de cette analyse est de déterminer le temps pendant lequel l'additif constitué d'antioxydants, de stabilisants et d'autres produits contenus dans un échantillon de PE inhibe l'oxydation lorsque l'échantillon est maintenu isothermiquement à une température spécifiée (200°C) dans un courant d'oxygène. Ce temps peut donner une indication sur le niveau d'antioxydants résiduels efficaces et sur le temps pendant lequel l'échantillon peut être exposé à l'oxygène pur à la température de l'essai avant le déclenchement de l'oxydation. Dans des conditions atmosphériques normales à température ambiante, cette durée sera plus longue.

Le temps d'induction à l'oxydation (TIO) est déterminé selon la figure 6.

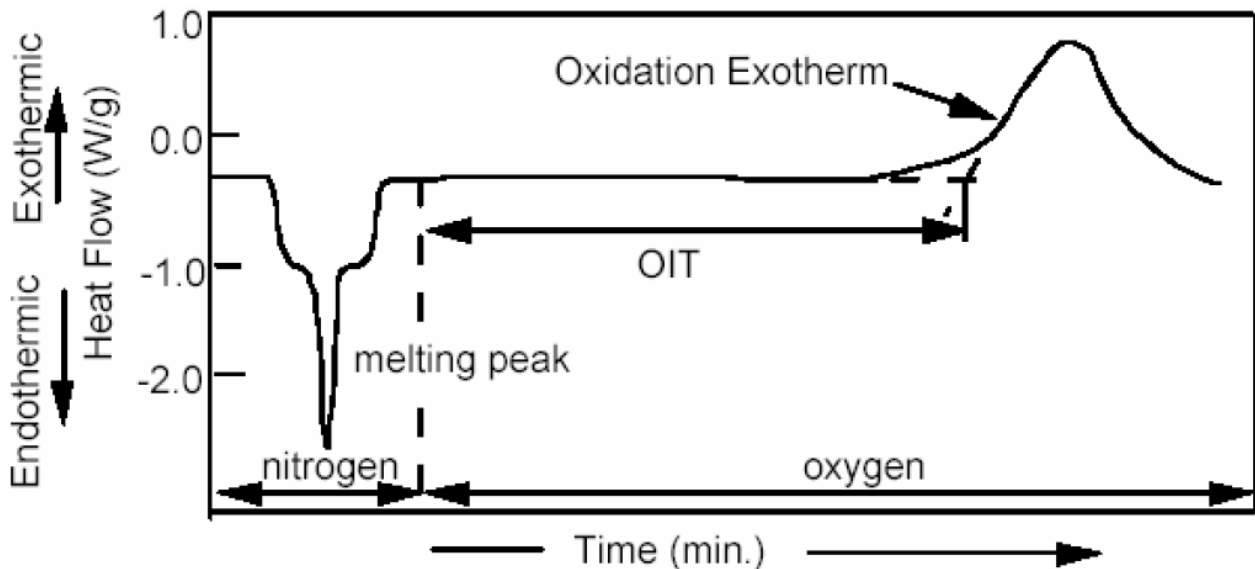


Figure 6. Méthode de détermination du temps d'induction à l'oxydation sur un thermogramme de DSC

### 2.2.2. Essais mécaniques et dimensionnels

Les mesures d'épaisseur, de masse surfacique et des propriétés de traction ont été réalisées selon les normes en vigueur moyennant quelques adaptations induites par la taille réduite des échantillons collectés.

### 3. Résultats et discussion

On propose de comparer les résultats obtenus avec des valeurs courantes actuelles obtenues sur GMB en PEHD neuve de caractéristiques générales équivalentes (épaisseur, densité, % de noir de carbone...). Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3. Valeurs courantes des caractéristiques d'une GMB PEHD 1,5mm

Paramètre	Unité	Valeurs courantes	Référence
Température de fusion	°C	128-130	(PONS,2012), obtenu sur film PE
Cristallinité	%	46	(PONS,2012)
TIO	mn	122-174	(Hsuan et Guan, 1997), (Row e et Rimal, 2008), (Row e et Islam, 2009), (Row e et al. 2010)
Epaisseur	mm	1,5-1,6	Fiches techniques fournisseurs, paramètre ASQUAL
Masse surfacique	g/mm <sup>2</sup>	1450-1550	Fiches techniques fournisseurs, paramètre ASQUAL
Résistance à la traction, au seuil d'écoulement (max SP/ST)	kN/m	26-29	Fiches techniques fournisseurs, paramètre ASQUAL
Déformation au seuil d'écoulement (max SP/ST)	%	10-13	Fiches techniques fournisseurs, paramètre ASQUAL

#### 3.1. Résultats et commentaires des essais

##### 3.1.1. Spectrométrie IRTF- ATR

- Faces exposées :

Sur les spectres IRTF-ATR de la face exposée des trois échantillons prélevés le long des soudures (205ECH19, 206ECH19 et 209ECH19) (Figures 7-a, 7-b et 7-c), la présence des bandes d'absorption à 1714 et 1170 cm<sup>-1</sup>, caractéristiques des groupements esters, et à 1035 cm<sup>-1</sup>, caractéristique des groupements éthers, démontrent une oxydation de la surface de la géomembrane.

Les spectres IRTF-ATR des faces exposées enterrées et non enterrées de la géomembrane prélevée au sommet du talus Sud (210ECH19) (Figures 7-d et 7-e) montrent la présence des groupements esters et des groupements éthers. Ces bandes mettent en évidence une oxydation de la surface de ces parties exposées de la géomembrane.

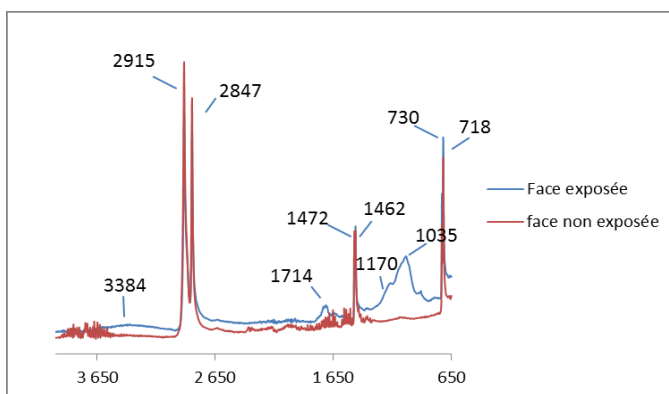


Figure 7-a. Spectres de la GMB PEHD 205ECH19

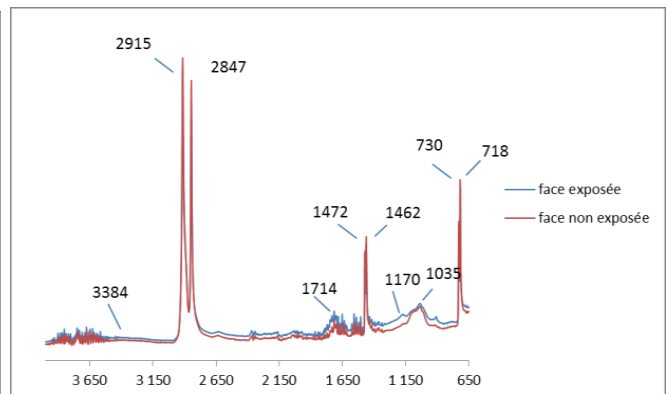


Figure 7-b. Spectres de la GMB PEHD 206ECH19

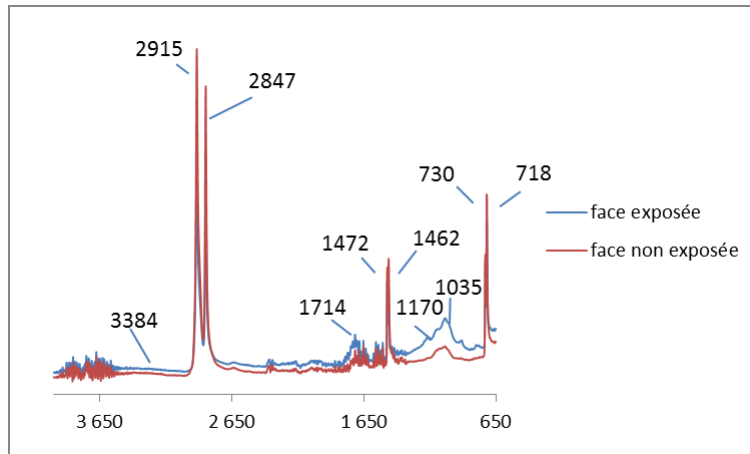


Figure 7-c. Spectres de la GMB PEHD 209ECH19

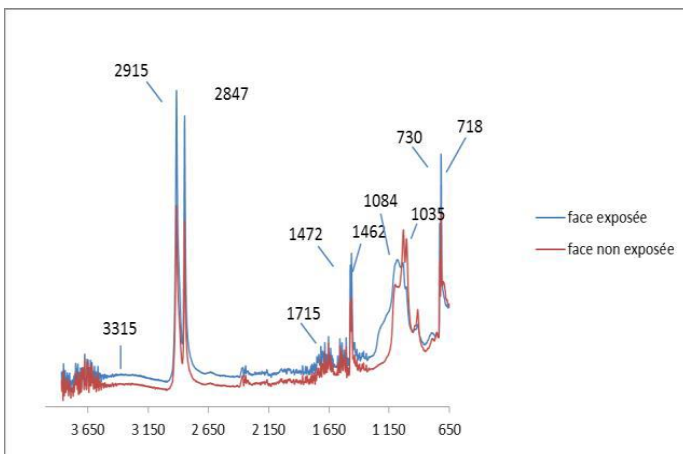


Figure 7-d. Spectres de partie non enterrée de la GMB PEHD non soudée 210ECH19

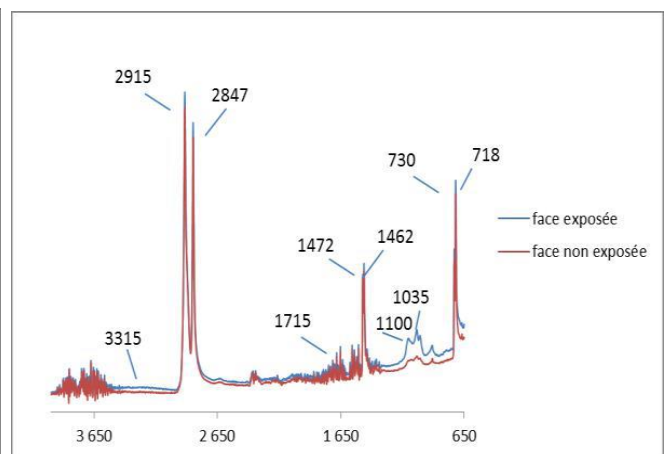


Figure 7-e. Spectres de partie enterrée de la GMB PEHD non soudée 210ECH19.

Sans chercher à quantifier l'oxydation des échantillons, on remarque que les bandes d'oxydation présentes sont plus intenses sur le spectre de la partie de la GMB non enterrée que sur celui de la partie de GMB enterrée. Les modifications chimiques de cette partie de la GMB sont donc plus importantes. En effet, cette partie de GMB non recouverte est soumise aux rayons UV.

- Faces non exposées :

Sur le spectre IRTF-ATR des 3 échantillons non exposés (UV) proches des soudures (205ECH19, 206ECH19, 209ECH19), on note des niveaux d'oxydation variables respectivement nul, modéré et significatif. La partie libre de la GMB le long des soudures, d'où sont issus les échantillons, étant variablement plaquée sur le lé adjacent, on pourrait attribuer ces variations à ces conditions différentes.

Sur les spectres IRTF-ATR des faces non exposées de l'échantillon (210ECH19, la présence des bandes d'absorption des fonctions des produits d'oxydation met en évidence une oxydation de la surface des faces non exposées de la GMB qu'elles soient enterrées ou non enterrées. On remarque que ces bandes d'oxydation sont plus intenses sur le spectre de la GMB non enterrée. Bien que les zones analysées ne soient pas directement exposées aux intempéries, ces différences d'intensité d'absorption montrent que des modifications chimiques plus prononcées ont eu lieu sur la partie non enterrée que sur la partie enterrée de la GMB. La partie enterrée de la GMB étant potentiellement exposée à la migration des substances volatiles des déchets (prélèvement en bordure du confinement), on en déduit que l'oxydation chimique liée à la présence des déchets est soit absente soit inopérante sur la GMB.

## 3.1.2. Analyse thermique par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)

Les résultats des mesures de température de fusion et de cristallinité sont présentés dans le tableau 4

Tableau 4. Taux de cristallinité (en %) et températures de fusion (en °C) des échantillons

Code échantillon	Température de fusion (°C)	Taux de cristallinité (%)
205ECH19	132,1 +/-0,8	63,5 +/- 0,3
206ECH19	130,3 +/-0,4	62,8 +/- 1,1
209ECH19	130,3 +/-0,6	63,6 +/- 0,0
210ECH19 zone non enterrée	130,2 +/-0,3	55,9 +/-0,2
210ECH19 zone enterrée	130,1 +/-0,5	53,2 +/-0,5

Une nette évolution de la cristallinité apparaît entre les mesures (53 à 63%) et les valeurs courantes d'une GMB neuve (environ 46%). Le vieillissement se traduit ainsi par une perte de souplesse liée à la structure nettement plus cristallisée du polymère sur les échantillons 205, 206 et 209 et à moindre titre sur l'échantillon 210. L'analyse des expositions aux différents facteurs de vieillissement des échantillons (Tableau 1) selon leur mode de gisement permet d'éclairer la différence de résultats entre l'échantillon 210 et les 3 autres. L'échantillon 210 est orienté ouest, son exposition lui confère pour sa partie exposée un rayonnement solaire, facteur de photo-oxydation, un peu moins important que celui des 3 échantillons exposés sud. Il n'est pas en contact avec le sol pour sa partie exposée et se situe en contexte végétalisé, ce qui limite nettement les températures du sol en contact avec sa partie non exposée. Ce n'est pas le cas des 3 autres échantillons en contact direct avec le sol non végétalisé. De l'expérience des auteurs, du fait de la faible conductivité thermique des sols en général et de l'absorption de chaleur lié à la couleur noire des GMB, la température de surface des sols nus recouverts de GMB peut régulièrement dépasser de plus de 15 à 20°C la température extérieure en été, soit des expositions ponctuelles à des températures proches de 50-60°C. Autre source de thermo-oxydation possible, ces 3 échantillons ont été prélevés le long de soudures automatiques. On notera également pour l'échantillon 210 un écart de seulement +2,7% entre la partie enterrée (53,2%) et la partie non enterrée (55,9%).

La température de fusion ne montre pas d'écarts significatifs selon les expositions ni avec les valeurs courantes de PEHD neuf. La taille des cristaux serait ainsi peu influencée par l'oxydation.

Les résultats des mesures du TIO sont présentés dans la figure 8

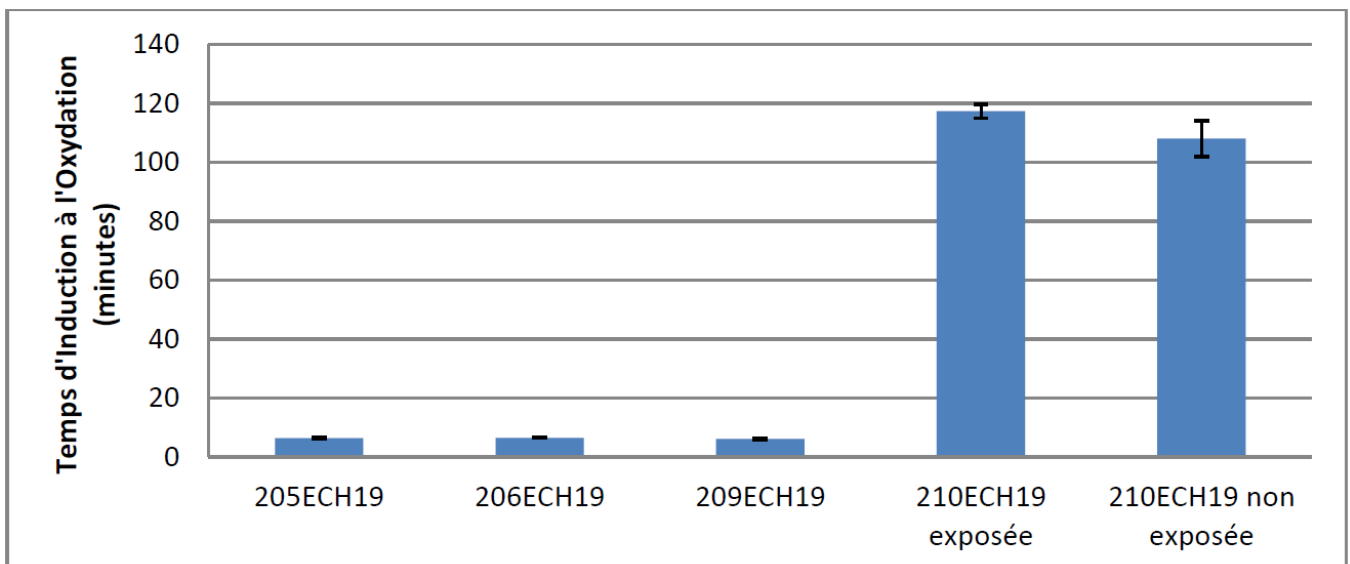


Figure 8. Temps d'induction à l'oxydation (TIO) en minutes



Le TIO des 3 échantillons les plus exposés et proches des soudures automatiques apparaît homogène (6,2 +/- 0,2 mn) mais très significativement réduit par rapport à des valeurs courantes de GMB neuve (122-174 mn). L'échantillon 210 de GMB prélevé hors soudure et moins exposé aux UV et aux pics de température estivaux conserve par contre un TIO plus proche de celui d'une GMB non oxydée pour les 2 faces. La différence entre la face exposée et la face non exposée, inverse à celle attendue, pourrait être liée au contact avec le sol qui peut jouer un rôle dans l'extraction des antioxydants.

### 3.1.3. Essais mécaniques et dimensionnels

Les moyennes des mesures d'épaisseur et les mesures de masse surfacique sont homogènes (respectivement 1,6mm et 1595 +/- 5 g/m<sup>2</sup>) et ne mettent en évidence aucune différences significatives avec les valeurs d'origine. Les résultats des paramètres de traction sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Résultats des tests de traction

Code échantillon	Résistance au seuil (kN/m)	Déformation au seuil (%)
205ECH19	38,2 +/-2,7	9,44 ± 1,20
207ECH19+208ECH19	36,0 +/-2,6	9,47 ± 1,06
209ECH19	35,8 +/-2,5	9,76 ± 1,41

La caractérisation de l'échantillon 210, de caractéristiques intermédiaires entre une GMB neuve et la GMB très exposée (échantillons 205 à 209), n'a malheureusement pu être réalisée. Pour les échantillons 205 à 209, on note que la résistance en traction (35-38 kN/m) est significativement plus élevée que les valeurs courantes (26-29 kN/m) et que l'allongement (9,4-9,7%) est plutôt inférieur à la gamme des valeurs courantes (10-13%). Cette modification du comportement mécanique du matériau, déjà mise en évidence antérieurement (Rowe et Al, 2009), correspond à une élévation du module de Young et à une rigidification du matériau.

Ainsi, après 26 ans, la GMB assure une résistance à la traction supérieure à celle d'origine et continue de satisfaire largement aux contraintes de service de l'ouvrage de confinement dans un contexte à déformations limitées (pas de tassements attendus, peu d'exposition au vent).

## 3.2. Autres observations sur site

Lors des prélèvements sur site, il a été procédé à des observations et à des tests empiriques de terrain sur les soudures automatiques (double canal) et sur les soudures par extrusion.

### 3.2.3. Soudures automatiques

Les tests réalisés consistent en une sollicitation de la soudure par pelage. D'une valeur purement indicative, ils sont régulièrement utilisés par l'auteur sur des missions de contrôle qualité et permettent de détecter des soudures défailtantes. Les tests réalisés sur quelques soudures proches des zones de prélèvement, ont montré la présence de plusieurs zones de fragilité.

### 3.2.3. Soudures par extrusion

Les observations sur les soudures par extrusion montrent que certaines présentent une fissuration ouverte marquée en bordure des extrusions, associée à des diminutions d'épaisseur (visibles mais non quantifiées) sur la limite entre GMB courante et extrusion (Figure 9a).

On note aussi des débuts de décollement des masses extrudées sur la GMB support (Figure 9b).



Figure 9a. Fissuration de bordure d'extrusion



Figure 9b. Décollement d'extrusion

#### 4. Conclusions et recommandations

Les mesures réalisées sur une géomembrane PEHD exposée durant 26 années ont permis de caractériser l'état de vieillissement du matériau soumis à divers niveaux d'exposition aux UV et aux pics de température. Les paramètres cristallinité et TIO apparaissent comme des indicateurs pertinents pour caractériser divers niveaux d'exposition, la cristallinité semblant plus apte à discriminer l'impact des niveaux d'exposition dans la gamme 0-30ans. L'oxydation mise en évidence par ces dernières mesures ainsi que par les analyses infrarouges amène à une rigidification du PEHD par ailleurs déjà démontrée. Les modifications structurales du matériau vieillissant n'induisent pas de perte de fonctionnalités en termes mécaniques sur ce site peu sollicité et ces résultats restent cohérents avec les prédictions du modèle de vieillissement de Koerner. On notera que la perte des fonctionnalités mécaniques, intervenant après 36 ans selon Koerner, intervient ainsi après la fin des déformations mécaniques des masses de déchets confinés pour la plupart des sites de stockage (hors déchets solubles ou spécifique), les durées de tassement étant généralement inférieures à une trentaine d'année.

L'étude relativise cependant ces résultats en confirmant le vieillissement accéléré au niveau des soudures, extrusion notamment, qui peuvent occasionner des pertes localisées de la fonction étanchéité et qui constituent ainsi le point faible des ouvrages de confinement. Ces désordres localisés restent cependant aisément repérables et réparables sur les GMB non recouvertes.

En termes de conception des ouvrages, il conviendra d'évaluer les efforts et déformations des GMB en fonction d'un état plus rigide du matériau. En termes de réalisation, on cherchera à minimiser le nombre soudures (GMB plus large) et à réduire les extrusions tant que faire se peut.

#### 5. Références bibliographiques

- Hsuan Y.G. & Guan Z. (1997) Evaluation of the oxidation behavior of polyethylene geomembranes using oxidative induction time tests, *Oxidative behavior of materials by thermal analytical techniques*, ASTM STP 1326, Riga A.T. and Patterson G.H., Eds., American Society for Testing and Materials.
- Koerner et Al. (2005) Geomembrane lifetime prediction: unexposed and exposed conditions, GRI White paper 6.
- PONS. (2012) Prédiction de la durabilité des géomembranes en PEHD utilisées dans les ISDND, Thèse de l'Université Paris Est, école doctorale Science, Ingénierie et Environnement.
- Rowe R. K. & Rimal S. (2008) Depletion of antioxidants from an HDPE geomembrane in a composite liner. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 134(1), 68–78,
- Rowe R.K & Islam M.Z. (2009) Impact of landfill liner time-temperature history on the service life of HDPE geomembranes, *Waste Management*, Vol.29, 2689-2699.
- Rowe R. K., Islam M.Z., Hsuan Y.G. (2010) Effects of thickness on the aging of HDPE geomembranes. *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(2), 299–309.
- Rowe R.K, Rimal S, Sangam S & Islam M.Z. (2009) Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures. *Geotextiles and geomembrane* 27 (137-151)