

# COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DES FIBRES D'UN GÉOTEXTILE POLYESTER VIEILLI EN LABORATOIRE ET DANS DES SOLS TRAITÉS.

## COMPARISON OF FIBRES PROPERTIES OF POLYESTER GEOTEXTILE AGING IN LABORATORY AND IN TREATED SOIL.

Laetitia VAN SCHOORS<sup>1</sup>, Issam NOUR<sup>1</sup>, Sandrine MOSCARDELLI<sup>1</sup>, Nicolas BARBERIS<sup>1</sup>, Dominique LOZACH<sup>2</sup>, Matoren KHAY<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> IFSTTAR, Paris, France

<sup>2</sup> CETE Normandie-Centre, Rouen, France

**RÉSUMÉ** – Cette étude vise à comparer le mécanisme et la cinétique de dégradation de fibres de polyester vieilles jusqu'à deux ans, d'une part en environnements alcalins en laboratoire et d'autre part enfouies dans un sol traité à Rouen (France). Les évolutions des propriétés fonctionnelles ont été déterminées pour les différents échantillons vieillis et corrélées à leurs caractéristiques physico-chimiques et morphologiques. Ces résultats mettent en évidence des diminutions notables des propriétés mécaniques de la fibre quel que soit le type de vieillissement. De plus, les mécanismes de dégradation semblent être assez proches entre les PET vieillis en laboratoire et dans les sols traités. Enfin, concernant la cinétique de vieillissement, il apparaît que la chute des propriétés est plus importante pour les matériaux enfouis dans les sols traités que pour ceux vieillis en laboratoire.  
Mots-clés : Géotextile, polyester, cinétique, vieillissement, alcalin.

**ABSTRACT** – This study aims at comparing the mechanism and kinetics of degradation of polyester fibres aged up to two years, on the one hand in alkaline environments in the laboratory and on the other hand buried in two treated soils in Rouen (France). Evolutions of functional properties were determined for different aged samples and correlated with their physico-chemical and morphological characteristics. Results obtained show significant decreases in mechanical properties of the fibre regardless of the type of aging. In addition, the degradation mechanisms appear to be similar between PET ageing in laboratory and treated soils. Finally, concerning the kinetics of aging, it appears that the fall of properties is higher for materials buried in treated soils for those aged laboratory.  
Keywords: Geotextile, polyester, kinetics, ageing, alkaline.

### 1. Introduction

Les géotextiles en polyéthylène téréphtalate sont utilisés pour le renforcement des sols car ces polymères présentent des caractéristiques mécaniques adaptées à l'application. En effet, ces géotextiles ont un module et une résistance mécanique élevés et un allongement à la rupture relativement faible. Cependant les polyesters peuvent être sujets à l'hydrolyse (Bellenger et al., 1995 ; Launay et al., 1994, 1999) ce qui entraîne des coupures de chaînes plus ou moins nombreuses en fonction des caractéristiques intrinsèques du matériau (Halse et al., 1987a, 1987b), du milieu (Elias et al., 1998 ; Haghghat Kish et Nouri, 1999 ; Vouyovitch Van Schoors et al., 2009) et de la température (Burgoyne et Merii, 2007 ; Datye et Palan, 1989). Aujourd'hui, les polyesters sont principalement utilisés dans des sols chimiquement neutres, faiblement acides ou faiblement alcalins où les températures sont relativement faibles (<10°C). Dans ces conditions, différents auteurs ont estimé que ces matériaux avaient des durées de vie de l'ordre d'une centaine d'années (Burgoyne et Merii, 2007 ; Elias et al., 1998).

Cependant, il y a encore quelques années, ces matériaux pouvaient être utilisés pour renforcer des sols traités à la chaux par exemple. Dans des conditions plus agressives, la réaction d'hydrolyse est catalysée par les ions OH<sup>-</sup> de ce fait la cinétique de dégradation peut être fortement accélérée. À 20°C, des chutes de résistance mécanique de géotextile polyester vieilli en laboratoire ont été estimées à 0,35-0,7% par an à pH 10 et compris entre 4 et 25% par an à pH 12. (Burgoyne et Merii, 2007 ; Elias et al., 1998). De plus, dans ces milieux, les dégradations sont différentes de celles observées à pH neutre ou acide. De nombreuses études (Doll et al., 1995 ; Haghghat Kish et Nouri, 1999 ; Halse et al., 1987a, 1987b) réalisées sur des géotextiles polyester vieillis en laboratoire ont montré que l'attaque des fibres était principalement localisée en surface du fait de la faible polarité des PET qui limiterait la diffusion des

ions OH<sup>-</sup> au cœur des matériaux. Ainsi l'hydrolyse générerait une érosion surfacique entraînant une réduction progressive du diamètre des fibres.

Cette étude a pour objectif de comparer les mécanismes de dégradation et les cinétiques d'évolutions des résistances mécaniques de fibres de polyester vieilles jusqu'à deux ans à pH 11 en laboratoire et d'autre part enterrées dans un sol traité à Rouen. Concernant les mécanismes, les évolutions des caractéristiques physico-chimiques, morphologiques et mécaniques ont été déterminées pour les différents échantillons vieillis afin d'identifier d'éventuelles différences entre les matériaux vieillis dans des conditions contrôlées en laboratoire et dans un sol traité. De plus, les cinétiques d'évolution de résistances mécaniques des fibres ont été déterminées à partir des fibres vieilles en laboratoire et comparées aux variations de résistance mécanique du matériau vieilli en sol traité.

## 2. Matériaux et techniques expérimentales

### 2.1. Matériaux – Fibres étudiées

Les fibres analysées lors de cette étude sont issues de géotextiles de renforcement en polyéthylène téréphthalate (PET). Les caractéristiques de ces fibres de PET sont listées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres de PET

	Fibres PET
Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	22,2 $\pm$ 1,0
Température de transition vitreuse ( $^{\circ}\text{C}$ )	80,0 $\pm$ 1,0
Densité	1,36 $\pm$ 0,01
Allongement à la rupture (%)	10,5 $\pm$ 1,5
Résistance mécanique (GPa)	1,1 $\pm$ 0,1
Module tangent entre 2 et 4% de déformation (GPa)	15 $\pm$ 2

### 2.2. Conditions de vieillissement

Afin de comparer l'évolution des caractéristiques des fibres polyesters vieilles en laboratoire et dans un sol alcalin, ces matériaux ont été soumis à deux types de vieillissement distincts.

Concernant le premier type de vieillissement, les fibres ont été immergées dans une solution tampon de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> à pH 11 à 4 températures c'est-à-dire 45, 55, 65 et 75 $^{\circ}\text{C}$  pendant des temps s'échelonnant de 22 jours à 2 ans.

Pour le vieillissement en sols alcalins, les fibres ont été enterrées sous forme de géotextile dans un sol traité à Rouen. Les planches d'essais ont été mises en œuvre sur un remblai de 12 mètres de longueur, de 5 mètres de largeur et 0,6 m d'épaisseur. Ce remblai comporte un sol support en matériau naturel chimiquement neutre classé B5 et un sol de recouvrement fin traité à la chaux. Les vieillissements se sont échelonnés de un jour, c'est-à-dire juste après la mise en œuvre, à 21 mois. Les différentes étapes de mise en œuvre et de démontage sont présentées à la figure 1.

Le nombre de planches d'essais et les caractéristiques du sol sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques du sol

Planche d'essai	Temps de vieillissement	Température T du sol en contact avec le géotextile ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH moyen du sol
1	1 jour	7,6	11,6
2	7 jours	8,3	11,5
3	1 mois	12,2	11,6
4	6 mois	19,7	11,4
5	12 mois	4,7	11,6
6	21 mois	2,5	11,9
		T moyenne : 9,2 $^{\circ}\text{C}$	pH moyen : 11.6

Dans le cadre de cette étude, les fibres ont été prélevées dans les différentes planches pour être caractérisées.

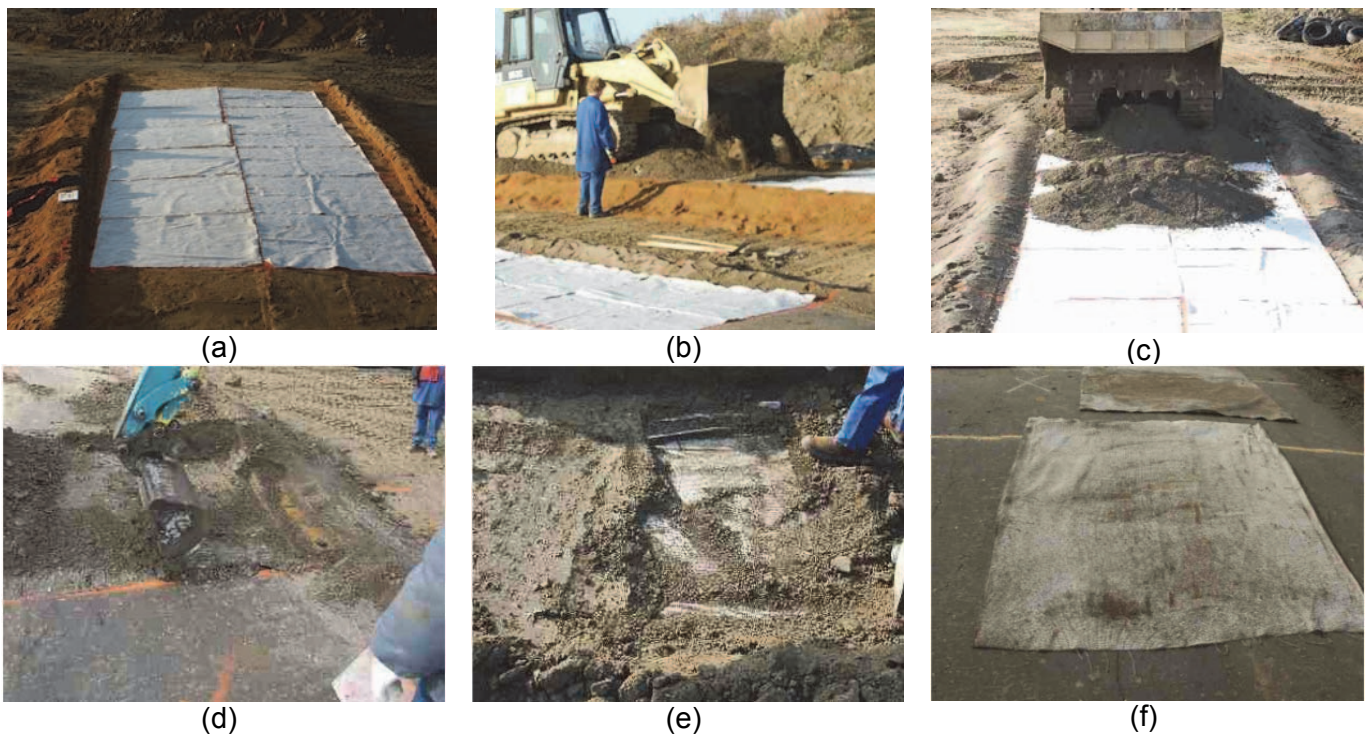


Figure 1. Photographies des différentes étapes de mise en œuvre et de démontage du remblai, (a) pose des nappes de géotextile, (b et c) mise en œuvre du sol de couverture, (d) 1<sup>ère</sup> étape de démontage avec une mini-pelle avec godet de curage (e) et finition à la main pour éviter l'endommagement du géotextile, (f) nappes de géotextile récupérées.

### 2.3. Techniques expérimentales

Les fibres ont été caractérisées à différentes échelles afin de déterminer l'influence du milieu de vieillissement sur les mécanismes de dégradations.

#### 2.3.1. Détermination des masses moléculaires moyennes par mesure de viscosité

Les masses moléculaires moyennes en nombre ont été calculées à partir des mesures de viscosité intrinsèques en se basant sur les travaux de Pawlak (Pawlak et al., 2000). Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un viscosimètre capillaire de type Ubbelohde ASTM 1B à 25°C. Pour cela, les fibres ont préalablement été dissoutes dans un mélange phénol/1,1,2,2-tétrachloroéthane en proportion en masse 60/40 à 110°C pendant 15 minutes. Pour chaque condition de vieillissement, quatre concentrations ont été réalisées à 0,01, 0,02, 0,03 et 0,04g/l afin de déterminer la viscosité intrinsèque.

Chaque mesure de viscosité a été répétée trois fois par échantillon pour chaque condition de vieillissement.

#### 2.3.2. Caractérisation morphologique

Un microscope électronique à balayage Philips XL30 a été utilisé pour mettre en évidence d'éventuelles évolutions morphologiques des fibres induites par le vieillissement. Deux modes de détection ont été employés. Premièrement, la surface des fibres a été analysée en mode électron secondaire et deuxièmement, le diamètre des fibres a été déterminé à partir d'images de la section des fibres réalisées en mode électrons rétro-diffusés. Pour accéder aux caractéristiques dimensionnelles, telles que le diamètre des fibres, un traitement d'image a été réalisé via le logiciel « Picture » développé à l'Ifsttar.

#### 2.3.3. Caractérisation mécanique des fibres

Les fibres unitaires ont été analysées mécaniquement à l'aide d'une presse de traction ZWICK 1474. Les modules d'Young ont été mesurés entre 2 et 4 % de déformation. Au moins 30 fibres unitaires ont été testées pour chaque essai.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Impact des vieillissements sur les masses molaires moyennes des fibres PET

Pour comparer les dégradations chimiques des fibres de PET vieilles en laboratoire et sur les planches d'essais, l'évolution des masses moléculaires moyennes en nombre a été déterminée à partir des mesures de viscosité intrinsèque réalisées sur les fibres vieilles et non vieilles.

Les masses moléculaires moyennes ont été calculées en se basant sur la relation établie par Pawlak et al. (2000) donnée par l'équation 1 :

$$M_n = 3,29 \cdot 10^4 [\eta]^{1,54} \quad (1)$$

La figure 2 présente les variations des masses moléculaires moyennes en nombre en fonction du vieillissement. À pH 11, les chutes de masse peuvent atteindre jusqu'à 30% à 75°C mais sont inférieures à 5% après 2 ans de vieillissement à 45°C. Pour les fibres vieilles 21 mois dans le sol traité, la chute de masse moléculaire moyenne en nombre peut atteindre plus de 15%.

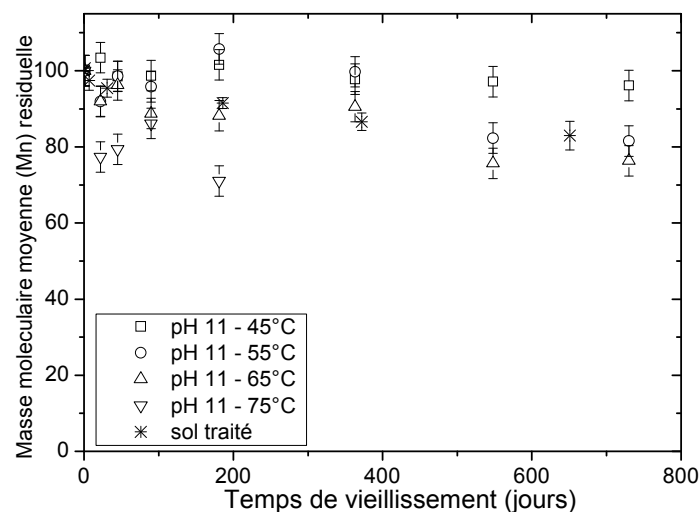


Figure 2. Évolution de la masse moléculaire moyenne en nombre en fonction du temps de vieillissement de PET vieillis jusqu'à 2 ans en laboratoire à pH 11 (45, 55, 65 et 75°C) et en sol traité (pH moyen = 11,6, Température moyenne 10°C).

Ces diminutions peuvent être attribuées à l'hydrolyse des fonctions ester qui engendre des scissions en chaîne. Toutefois, ces chutes ne sont généralement peu ou pas observées à pH 11, car les ions hydroxyles diffusent difficilement au cœur des fibres. Ainsi à ces pH les dégradations sont en général principalement en surface (Datye et Palan, 1989 ; Doll et al., 1995 ; Collins et al., 1991). Ainsi, contrairement à ces auteurs, ces analyses révèlent que l'attaque des fonctions ester par des ions hydroxyles à un pH compris entre 11 et 12 se produit entre autres dans le cœur de la fibre et donc que les ions pénétreraient dans les fibres.

De plus, les chutes de masse moléculaire moyenne relativement importantes observées pour les fibres vieilles en sol traité compte tenu de la faible température (<20°C) par rapport aux fibres vieilles en laboratoire peuvent être dues au pH du sol qui est supérieur à 11 (11,4 < pH < 11,9) et à de possibles contraintes mécaniques exercées sur le géotextile lors de la mise en œuvre des planches d'essai. Différentes études (East et Rahman, 1999 ; Netravali et al., 1993) ont en effet montré que les vieillissements couplés du pH et des contraintes mécaniques pouvaient favoriser notablement l'hydrolyse des fibres.

#### 3.2. Impact des vieillissements sur la morphologie des fibres PET

Pour compléter cette étude, nous avons comparé l'évolution du diamètre et de la surface des fibres de PET vieilles en laboratoire et sur les planches d'essais. Pour cela deux types d'analyses morphologiques ont été réalisés.

Tout d'abord, l'évolution du diamètre des fibres a été déterminée par analyse d'image de photographies de sections de fibres réalisées par microscopie électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés. Il apparaît sur la figure 3 que le vieillissement en laboratoire génère des diminutions de diamètres des fibres d'autant plus importantes à des températures supérieures à 55°C que les temps de vieillissement sont élevés. Ces évolutions ont déjà été observées dans ces conditions de vieillissement dans de nombreuses études. En revanche, pour les vieillissements en laboratoire à 45°C et en sol alcalin à pH compris entre 11,4 et 11,9 et à des températures inférieures à 20°C, aucune évolution de diamètre n'a été observée même après 2 ans de vieillissement. Ainsi les vieillissements réalisés à température inférieure à 45°C ne semblent pas générer d'érosion surfacique après deux ans de vieillissement même à des pH élevés (pH>11).

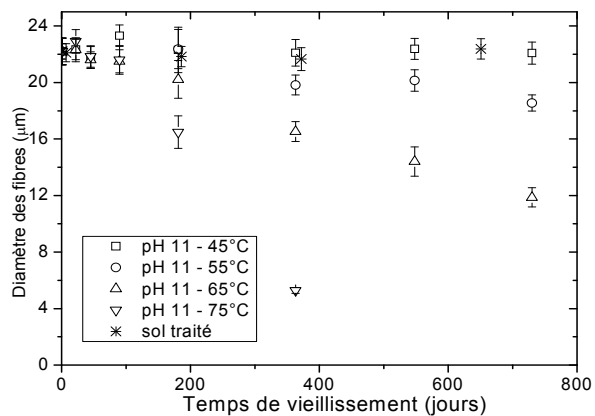


Figure 3. Évolution du diamètre des fibres en fonction du temps de vieillissement de PET vieillis jusqu'à 2 ans en laboratoire à pH 11 (45, 55, 65 et 75°C) et en sol traité (pH moyen = 11.6, Température moyenne = 10°C)

Pour poursuivre cette étude, les surfaces des fibres ont été observées par microscopie électronique à balayage en mode électrons secondaires. Il apparaît, comme le montre la figure 4, que ce type de vieillissement génère la formation de microcavités pour les fibres de PET vieilles en laboratoire et dans le sol traité.

Pour les vieillissements en laboratoire les microcavités sont d'autant plus nombreuses et profondes que les températures de vieillissement sont élevées. Concernant les fibres vieilles en sol traité la morphologie des microcavités semble être relativement proche de celle des fibres vieilles en laboratoire à 45°C. Ainsi même si aucune variation de diamètre n'a été mise en évidence sur les fibres vieilles à 45°C en laboratoire et vieilles en sol traité, cette analyse surfacique a tout de même révélé la formation de microcavités probablement due à l'attaque des fonctions esters de surface par des ions hydroxydes.

### 3.3. Impact des vieillissements sur les propriétés mécaniques des fibres

Les propriétés mécaniques en traction des fibres vieilles en laboratoire et sur planches d'essais ont été mesurées afin de déterminer l'effet des évolutions chimiques et morphologiques sur ces caractéristiques. Dans cet article ne sera présentée que l'évolution de la résistance mécanique. Afin de caractériser l'évolution réelle de cette caractéristique au cours du vieillissement, les résistances mécaniques résiduelles sont exprimées en Newton et normalisées par rapport à la résistance initiale des fibres non vieilles.

La figure 5 présente l'évolution de résistance mécanique résiduelle des fibres polyester en fonction du temps pour les deux types de vieillissement.

Ces essais de traction sur fibres unitaires ont tout d'abord montré que le vieillissement en laboratoire pH 11 entraîne des chutes de résistance mécanique d'autant plus importantes que le temps et la température de vieillissement sont élevés. Ces évolutions ont également été observées par de nombreux auteurs (Burgoyne et Merii, 2007; Elias et al., 1998).

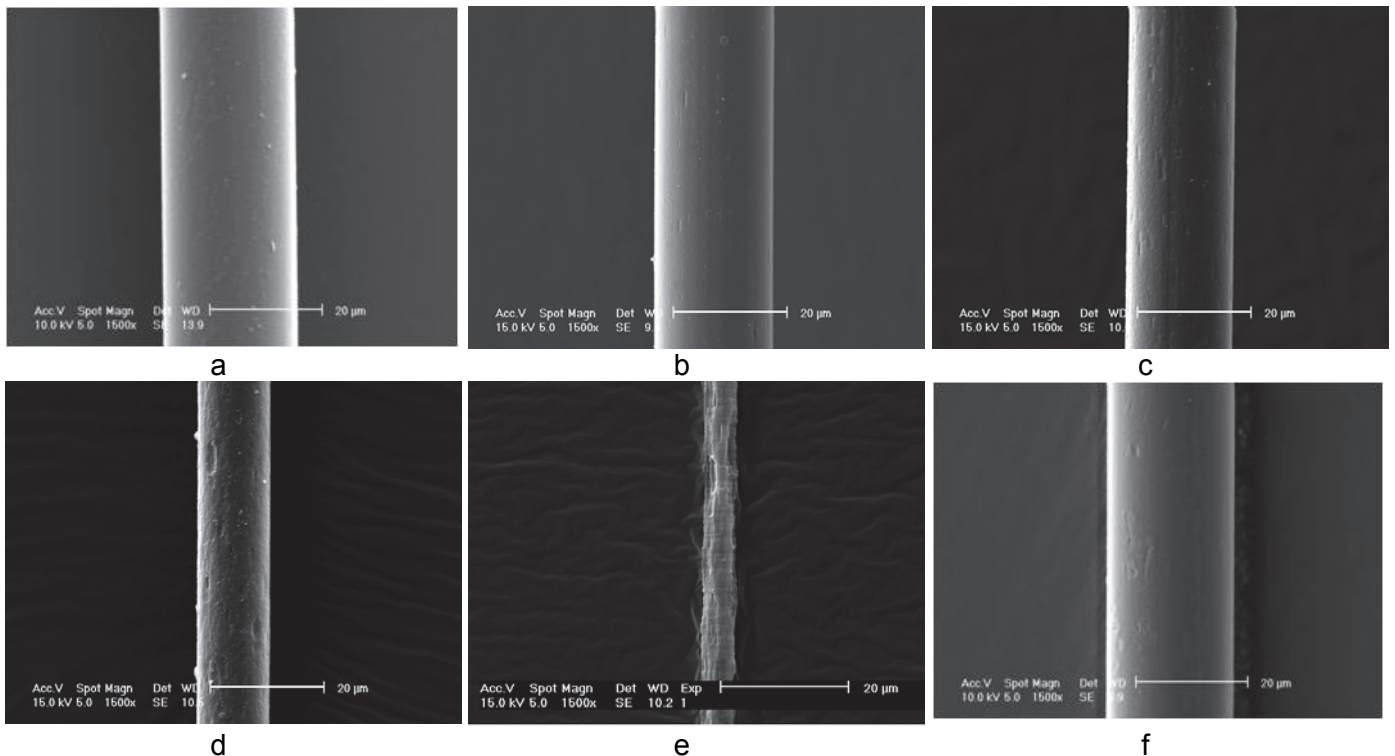


Figure 4. Image de microscopie électronique à balayage de fibres de PET (a) non vieilles, et vieilles 2 ans en laboratoire à pH 11 à 45°C (b), à 55°C (c), à 65°C (d) un an et demi à 75°C(e) et vieilles en sol traité (pH moyen = 11.6, Température moyenne 10°C) pendant 21 mois (f).

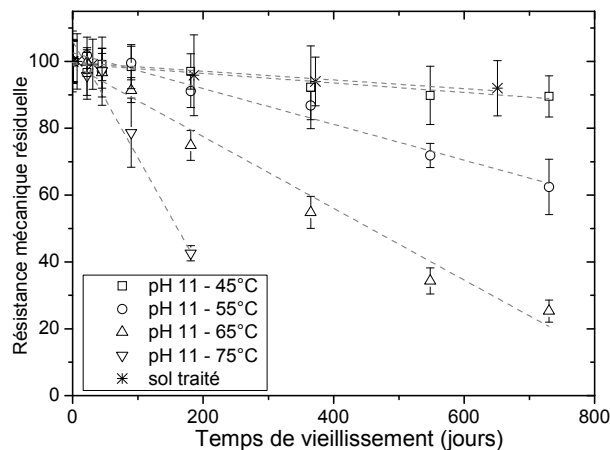


Figure 5. Évolution de la résistance mécanique résiduelle en fonction du temps de vieillissement de PET vieillis jusqu'à 2 ans en laboratoire à pH 11 (45, 55, 65 et 75°C) et en sol traité (pH moyen = 11,6 ; Température moyenne 10°C)

De plus, en comparant les variations de résistance des fibres vieilles en laboratoire à 45°C pH 11 et les mêmes fibres vieilles en sol traité à Rouen ( $2,5^{\circ}\text{C} < T < 19,7^{\circ}\text{C}$  –  $11,4 < \text{pH} < 11,9$ ), il apparaît que les diminutions de résistance mécanique atteignent respectivement 10% après 2 ans de vieillissement et 8% après 21 mois de vieillissement. Ainsi, ces chutes de résistance mécanique semblent très proches dans ces deux milieux malgré un écart de température important entre ces deux vieillissements (35°C en moyenne). Notons également une légère différence de pH (+ 0,6 en moyenne pour les fibres vieilles en sol alcalin).

À partir des évolutions de résistance mécanique des fibres vieilles en laboratoire et compte tenu que ces diminutions semblent être linéaires avec le temps de vieillissement aux quatre températures étudiées, nous avons essayé d'estimer les pertes de résistances pour des températures de vieillissement de 10°C, température moyenne correspond aux fibres vieilles dans le sol traité. Pour cela, nous nous sommes basés sur un modèle Arrhénien d'équivalence temps-température. Les constantes de vitesse  $k$  de diminution de la résistance mécanique des fibres de PET ont été déterminées à partir

des pentes des droites d'évolution de résistance mécaniques en fonction du temps de vieillissement à 45°C, 55°C, 65°C et 75°C.

Ainsi, la figure 6 présente le diagramme d'Arrhénius des constantes de vitesses des fibres PET vieilles en laboratoire aux quatre températures de l'étude.

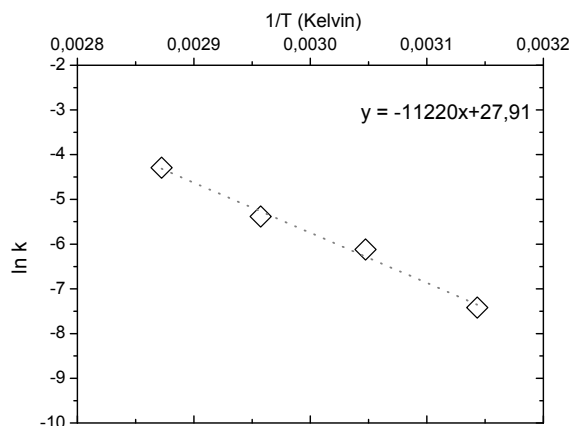


Figure 6. Évolution des constantes de vitesse de diminution de la résistance mécanique de fibres PET vieilles jusqu'à 2 ans en laboratoire à pH 11 à 45, 55, 65 et 75°C.

En se basant sur ce diagramme d'Arrhénius, la relation empirique donnée par l'équation 2 a été déterminée entre la constante de vitesse relative à la chute de résistance mécanique et la température.

$$\ln k = -11220(1/T) + 27,91 \quad (R^2 = 0,987) \quad (2)$$

À partir de cette relation, l'énergie d'activation calculée est de l'ordre de 93kJ/mol. Ces valeurs sont proches de celles estimées par d'autres auteurs (Burgoyne et Merii, 2007; Elias et al., 1998).

À partir de cette relation d'Arrhenius (2), il apparaît que les chutes de diminution de résistance mécanique seraient de l'ordre de 0,3% par an à 10°C et 1,15% par an à 20°C pour ces fibres PET à pH 11. Ces chutes de résistance mécanique estimées sont très inférieures à celles des fibres vieilles en sol traité (8% après 21 mois). Cette différence peut être liée :

- au pH du sol traité supérieur à 11,
- aux conditions de mise en œuvre des planches d'essais qui auraient pu altérer partiellement les caractéristiques des fibres,
- à un vieillissement multi contraintes (micro-organismes, compression, pH, Température...) dans le sol par rapport au vieillissement en laboratoire (pH et température),
- à l'utilisation d'un modèle de prédiction de durée de vie basé sur la loi d'Arrhenius qui s'applique lorsque le vieillissement est régi par un mécanisme de dégradation élémentaire. Concernant l'évolution de la résistance mécanique des fibres polyester en milieu fortement alcalin, elle semble être liée principalement à la réaction d'hydrolyse des fibres mais cette réaction d'hydrolyse peut avoir des caractéristiques cinétiques différentes en fonction que la réaction ait lieu au cœur de la fibre (chute des masses moléculaires moyennes) ou à la surface de la fibre (érosion surfacique générant une diminution de diamètre).

Cependant malgré cette sous-estimation de chute de la résistance mécanique, les dégradations mises en évidence pour les fibres vieilles en laboratoire et dans le sol traité sont de même nature (formation de microcavités et scissions des chaînes macromoléculaires). Ainsi la méthode de vieillissement accéléré en laboratoire développée pour cette étude semble pouvoir être partiellement validée en vue de la prédiction de la durée de vie sur le terrain, car les mécanismes impliqués sont correctement reproduits

#### 4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons comparé dans un premier temps les évolutions macromoléculaires et morphologiques engendrées par le vieillissement des fibres en laboratoire et dans un sol traité. Des dégradations de même nature ont été observées pour les deux types de vieillissement, mais dans des proportions pouvant être différentes.

Il apparaît que les diminutions de masse moléculaire moyenne des fibres vieilles en sols traités à 10°C sont plus importantes que celles des fibres vieilles en laboratoire à 45°C. Ceci peut être attribué

au pH du sol supérieur à 11 et à de possibles contraintes mécaniques liées à la mise en œuvre des planches d'essais.

Concernant la variation de diamètre liée à l'érosion surfacique des fibres, aucune évolution n'est observée après deux ans de vieillissement en sol traité et en laboratoire à 45°C. Cependant les analyses de surface par microscopie électronique à balayage ont révélé pour ces mêmes échantillons (vieillissement en sol traité et en laboratoire à 45°C) la formation de microcavités de morphologies identiques.

Dans un second temps, l'étude de l'évolution de la résistance mécanique a montré que les chutes atteignent 10% après 2 ans de vieillissement à 45°C et 8% après 21 mois de vieillissement. En se basant sur les vieillissements accélérés en laboratoire, des extrapolations basées sur des lois d'Arrhénius ont permis d'estimer qu'aux températures du sol traité, les chutes de résistance mécanique auraient dû être au maximum de 1,15% par an. Cette sous-estimation peut être liée au fait que le sol ait un pH supérieur à 11, que la mise en œuvre des planches ait généré des dégradations, que ce vieillissement soit multi-contraintes, et souligne le fait que le modèle Arrhénien même avec un coefficient de corrélation de 0,987 doit être utilisé avec prudence pour estimer des durées de vie.

Cependant cette étude a tout de même permis de mettre en évidence que le vieillissement réalisé en laboratoire sur ces fibres engendrait les mêmes mécanismes de dégradation que les vieillissements en sols traités.

## 5. Références bibliographiques

- Bellenger V., Ganem M., Mortaigne B., Verdu J. (1995). Lifetime prediction in the hydrolytic ageing of polyesters. *Polymer Degradation and Stability* 49 (1), pp. 91-97.
- Burgoyne C.J., Merii A.L. (2007). On the hydrolytic stability of polyester yarns. *Journal of materials science* 42, pp. 2867-2878.
- Collins M.J., Zeronian H.S., Semmelmeier M. (1991). Use of aqueous alkaline hydrolysis to reveal the fine structure of poly(ethylene terephthalate) fibres. *Journal of Applied Polymer Science* 42(8), pp. 2149-2162.
- Datye K.V., Palan B.H. (1989). Effect of alkali on filaments of poly(ethylene terephthalate) and its copolyesters. *Journal of Applied Polymer Science* 38(8), pp. 1447-1468.
- Doll W.W., Goodrum R., Sprague C.J. (1995). Alkaline hydrolysis testing of polyester to-date. *Geosynthetics'95*, pp. 975-988.
- East G.C., Rahman M. (1999). Effect of applied stress on the alkaline hydrolysis of geotextile poly(ethylene terephthalate). Part 1: Room temperature. *Polymer* 40(9), pp. 2281-2288.
- Elias V., Salman A., Goulias D. (1998). Effect of pH, resin properties and manufacturing process on laboratory degradation of polyester geosynthetics. *Geosynthetics International*, 5(5): pp. 459-490
- Halse Y., Koerner R.M., Lord Jr A.E. (a) (1987). Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. part 2: NaOH solution. *Geotextiles and Geomembranes* 6(4): pp. 295-305.
- Halse Y., Koerner R.M., Lord Jr A.E. (b) (1987). Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. part 1: Ca(OH)<sub>2</sub> solutions. *Geotextiles and Geomembranes* 5 (4 ): pp. 261-282.
- Haghighat Kish M., Nouri M. (1999). Effects of sodium hydroxide and calcium hydroxide on polyester fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, 72(5) : 631-637.
- Launay A., Thominet F., Verdu J. (1994). Hydrolysis of poly(ethylene terephthalate): a kinetic study. *Polymer Degradation and Stability* 46(3), pp. 319-324
- Launay A., Thominet F., Verdu J. (1999). Hydrolysis of poly(ethylene terephthalate). A steric exclusion chromatography study. *Polymer Degradation and Stability* 63(3), pp. 385-389.
- Netravali A.N., Krstic R., Crouse J.L., Richmond L.E. (1993). Chemical stability of polyester fibers and geotextiles without and under stress. *ASTM Special Technical Publication* 1190, pp. 207-217.
- Pawlak A & Pluta M. & Morawiec J. & Galeski & Pracella M. (2000). Characterization of scrap poly(ethylene terephthalate). *European Polymer Journal* 36(9), pp. 1875-1884
- Vouyovitch Van Schoors L., Lavaud S., Duragrin D., Barberis N. (2009). Durabilité des géotextiles polyester en milieu modérément alcalin. *Rencontres géosynthétiques* pp. 201-207.