

**ASSOCIATION DE DEFENSE CONTRE LE
PROJET DE CENTRE D'ENFOUISSEMENT SUR
LE TERRITOIRE DE LA COMMUNE DE
SAINT- ESCOBILLE (91) : ADSE**

**Mise en évidence de la vulnérabilité des barrières
géologiques et géosynthétiques utilisées pour le
confinement hydraulique des centres
d'enfouissement de déchets de classe II**

Septembre 2007

Par Bastien Bonte
Diplômé en Géoingénierie de l'environnement
Université Paul Sabatier Toulouse

SOMMAIRE

Résumé	p 4
Introduction	p 5
I – Le confinement des centres de stockage de déchets	p 6
I.1 – Présentation et enjeux	p 6
I.2 – Contexte réglementaire	p 6
I.3 – Description	p 8
I.3.1 – Barrière d’étanchéité active	p 8
I.3.1.1 - Systèmes de drainage actif des lixiviats	p 8
I.3.1.2 - Géotextiles de protection	p 8
I.3.1.3 - Géomembranes	p 8
I.3.2 – Barrière d’étanchéité passive	p 9
I.3.3 – Notion d’équivalence d’étanchéité	p 9
II – Mise en évidence de la vulnérabilité des barrières d’étanchéité: Synthèse bibliographique	p 12
II.1 – Les sollicitations de la barrière minérale passive	p 12
II.1.1 – Sollicitations chimiques	p 12
II.1.2 – Sollicitations thermiques	p 12
II.1.3 – Sollicitations mécaniques	p 13
II.2 – Vulnérabilité liée aux caractéristiques des matériaux et à leur mise en œuvre	p 13
II.3 – Les sollicitations et vulnérabilité de la barrière synthétique active	p 14
II.3.1 – Vulnérabilité du système de drainage des lixiviats et du géotextile de protection	p 14
II.3.2 – Sollicitations de la géomembrane	p 15
II.3.2.1 - Sollicitations physico-chimiques	p 15
II.3.2.2 – Sollicitations mécaniques	p 17
II.3.2.3 – Cas particulier du tassement des déchets	p 18
II.3.3 - Vulnérabilité liée aux caractéristiques des matériaux et à leur mise en œuvre	p 20
III – Les barrières d’étanchéités réglementaires: Une diffusion de la pollution dans le temps ?	p 21
III.1 - Conséquences des sollicitations	p 21
III.1.1 - Défauts et endommagements de la géomembrane	p 21
III.1.2 – Développement d’écoulements préférentiels au sein des matériaux argileux	p 21
III.1.3 – Modification de l’état hydrique des argiles et de ses propriétés	p 22
III.2 - Mécanismes de fuite et de transfert des polluants vers le milieu naturel	p 23

III.3– Les incertitudes scientifiques, les études d’impacts et le principe de précaution	p 23
III.4 – La durabilité des dispositifs d’étanchéité : Un manque de garanties et de fiabilité	p 24
III.5 – Trop d’incertitudes et de méconnaissances scientifiques	p 25
III.6 – Une réglementation pour la protection de la santé et de l’environnement ?	p 25
III.7 - La détection des fuites : Un outil de prévention des risques ?	p 26
Conclusion	p 27
Bibliographie	

RESUME

Les centres de stockage de déchets deviennent des ouvrages de plus en plus techniques au sein desquels interagissent des matériaux naturels (argile, sable), des matériaux artificiels (géosynthétiques) et les déchets dont le comportement est variable à la fois dans le temps et dans l'espace.

La réglementation française impose que le stockage des déchets ménagers et assimilés se fasse dans des ouvrages, dénommés techniquement des Installations de Stockage de Déchets (ISD), censés être respectueux de l'environnement. Le confinement des déchets et des fluides polluants engendrés par la percolation des eaux de pluie à travers les déchets, appelés lixiviats, est réalisé grâce à des structures d'étanchéité-drainage. Ce confinement a pour rôle de limiter le transfert de polluants vers le milieu environnant (sous-sol, nappes aquifères).

Les textes législatifs imposent qu'en fond d'ISD de classe II, le dispositif d'étanchéité soit formé d'une barrière de sécurité passive surmontée d'un niveau de sécurité actif dont la complémentarité constitue, en théorie, une technique capable d'assurer un niveau de protection maximal vis-à-vis de l'environnement. Cependant, l'étanchéité parfaite n'est jamais atteinte et les éléments polluants peuvent s'écouler à travers le dispositif d'étanchéité composite, soit sous l'action de gradients de concentration – c'est le transport par diffusion – soit sous l'action du gradient de charge hydraulique – c'est le phénomène de transport advectif.

Le transport par diffusion est quantifié au moyen de coefficients de diffusion propres à chaque polluant. Cependant des incertitudes scientifiques demeurent à ce sujet.

Le transport advectif se fait au travers de défauts qui apparaissent dans la géomembrane soit lors de son installation et/ou durant la période d'exploitation.

Le tassement et le poids des déchets, les hautes températures générées par les réactions de dégradation de la matière organique, ainsi que la composition chimique des lixiviats (qui demeure encore mal connue) et la faible épaisseur des géomembranes engendrent des défauts d'étanchéité. De nombreuses incertitudes scientifiques demeurent par rapport à la durabilité des systèmes d'étanchéité et sur la stabilité des massifs de déchets et des talus.

Il est reconnu que les lixiviats sollicitent l'argile d'étanchéité passive sous-jacente, s'infiltrant et peuvent dégrader à plus ou moins long terme, selon le contexte géologique et hydrogéologique, la nappe aquifère.

Le projet du centre d'enfouissement de classe II de Saint-Escobille s'inscrit dans un contexte justement sensible. En effet, les études de faisabilité identifient les formations géologiques existantes au droit du site, notamment les calcaires de Beauce et d'Etampes dont la perméabilité en grand (à l'échelle du massif calcaire) n'est pas caractérisée. Ainsi, des fissures de karstification peuvent mettre en continuité hydraulique, les formations superficielles et celles plus profondes.

INTRODUCTION

Historiquement, la mise en décharge a longtemps constitué un exutoire bon marché. En 1999, on dénombrait en France quelques 7800 décharges et environ 25 000 dépôts sauvages. Plusieurs milliers de ces dépôts sont restés en activité jusque dans les années 1990, ce qui a contribué à associer à la technique du stockage, une image négative justifiée. Face à ceci, les pouvoirs publics ont privilégié un temps l'incinération vis-à-vis du stockage, jusqu'aux questions actuelles (liées notamment à l'émission des dioxines) qui ont remis en cause la situation précédente.

Au cours de ces 30 dernières années, la quantité de déchets ménagers produits par les ménages a augmenté de 65 %, et représente actuellement plus d'1 kg de déchets par jour et par habitant.

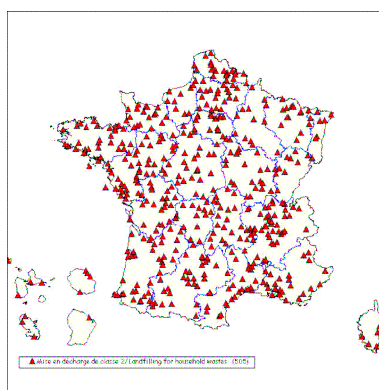


Figure n°1 : Cartographie des CSD français de classe II en activité (Ademe, 2000)

Cela a conduit les pouvoirs publics à réagir par la loi du 13 juillet 1992 en imposant une réduction à la source et une valorisation en matière et énergie de ces déchets, limitant ainsi le stockage aux seuls déchets ultimes dont la définition apparaît comme totalement dénuée de sens. Cependant, il apparaît aujourd'hui que le stockage représente encore 50 % du traitement des déchets ménagers (Ademe, 2000) et comprend environ 400 installations de classe II (Cf. Figure n°1). Ces dernières reçoivent annuellement quelques 15 millions de tonnes de déchets constitués pour environ 60 % de déchets ménagers et assimilés à quoi s'ajoutent les déchets industriels banals (DIB), boues d'assainissement, mâchefers non recyclables et enfin résidus de recyclage et d'incinération. Cette grande quantité et la diversité des déchets enfouis, le manque d'investissement collectif dans les filières de retraitements durables, ainsi que les nuisances et risques générés par de telles activités entraînent une forte mobilisation des populations riveraines contre ce type de projets. Par ailleurs, il apparaît que les dispositifs techniques et scientifiques mis en œuvre dans ces projets sont loin d'être infaillibles et que nous ne disposons pas du recul suffisant pour juger de leur efficacité en matière de sûreté publique et environnementale.

Ce travail a pour objectif de montrer que le projet du centre d'enfouissement technique de Saint-Escobille n'est pas une solution durable compte tenu d'un contexte local, humain et environnemental sensible. Pour cela nous verrons dans une première partie, une approche des techniques utilisées pour le confinement des déchets et le contexte réglementaire associé. Une seconde section sera consacrée à la mise en valeur de la vulnérabilité des barrières d'étanchéité et des différentes sollicitations auxquelles elles sont soumises. Enfin, à la lumière des données précédentes, mais aussi par une synthèse technico-scientifique, économique, réglementaire et politique, une troisième partie va montrer que le centre de stockage de Saint-Escobille représente une menace sur le moyen terme.

I – Le confinement des centres de stockage de déchets

I.1 – Présentation et enjeux

Le fond d'un site de stockage doit permettre d'assurer deux fonctions essentielles et complémentaires :

- La protection du sous-sol vis à vis des infiltrations de polluants (fonction d'atténuation et de rétention), c'est-à-dire le rôle de barrière.
- L'évacuation vers l'extérieur des lixiviats, durant la période où les flux sont les plus importants, c'est-à-dire le rôle de drainage.

Le stockage des déchets en France s'appuie sur le principe des barrières multiples (principe retenu au niveau Européen). Une barrière dite « active » est installée à la base des déchets : il s'agit d'un système d'étanchéité-drainage, constitué typiquement d'un horizon drainant surmontant une géomembrane. Cette barrière surplombe la barrière dite « passive », qui est soit constituée par le milieu géologique naturellement en place, ou alors qui peut être « rapportée » (reconstituée artificiellement).

Dès la fin du comblement d'un casier ou du site de stockage en lui-même, ce dernier est rendu plus ou moins étanche par la pose d'une barrière de couverture minérale et/ou synthétique. Cette couverture doit limiter les infiltrations d'eau à travers le massif de déchets lors de la phase de post exploitation.

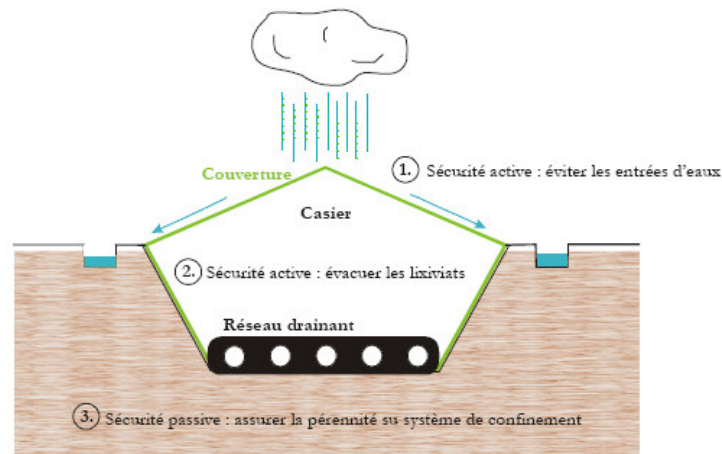


Figure n°2 : Principe du confinement des centres de stockage de déchets (ADEME, 1999)

La question de la durabilité de tels aménagements se pose donc naturellement puisque ce sont ces barrières qui doivent assurer le confinement des polluants et des déchets sur le long terme. Disposons-nous de garanties sur l'étanchéité des barrières actives et passives à plus ou moins long terme ? Comment réagissent les techniques utilisées faces aux nombreuses sollicitations engendrées par ces montagnes de déchets ?

I.2 – Contexte réglementaire

Les prescriptions techniques des installations de stockage de déchets sont définies par l'arrêté du 19 janvier 2006 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié le 31 décembre 2001. Cet arrêté reprend en droit national et pour les déchets non dangereux, les dispositions de la directive 1999/31/CE du 26 Avril 1999, relative à la mise en décharge des déchets.

Comme pour la classe I, "le contexte géologique et hydrogéologique du site doit être favorable. En particulier le sous-sol de la zone à exploiter doit constituer une barrière de sécurité passive qui doit permettre à long terme la prévention de la pollution des sols, des eaux souterraines et de surface par les lixiviats. La barrière de sécurité passive est normalement constituée par le substratum (formation géologique en place) du site qui doit présenter un coefficient de perméabilité inférieur à 10^{-9} m/s sur au moins 1 m et un coefficient inférieur à 10^{-6} m/s sur au moins 5 m". (Cf. Figure n°3).

La zone à exploiter est divisée en casiers qui sont délimités par une digue périmétrique stable et étanche, hydrauliquement indépendants, eux-mêmes éventuellement divisés en alvéoles.

Sur le fond et les flancs de chaque casier, une barrière de sécurité active assure l'indépendance hydraulique, le drainage et la collecte des lixiviats et doit éviter ainsi la sollicitation de la barrière de sécurité passive. La barrière de sécurité active est normalement constituée du bas vers le haut, d'une géomembrane, ou tout dispositif équivalent, surmontée d'une couche de drainage des lixiviats (Cf. Figure n°3).

Des dispositions doivent être prises pour éviter une alimentation latérale (donc par les flancs du casier), par une nappe ou des écoulements de surface. Pour cela, l'arrêté du 19 janvier 2006 stipule que les flancs sont constitués d'une couche minérale d'une perméabilité inférieure à 1.10^{-9} m/s sur au moins un mètre.

Lorsque la géologie naturelle ne permet pas de respecter les exigences réglementaires en matière de perméabilité, il est possible dans le cadre de mesures compensatrices, de mettre en oeuvre des moyens offrant le même niveau de protection (Cf. partie I.3.3).

Il est important de noter que la barrière dite "active" et celle dite "passive" sont complémentaires. En effet, la durée de vie de la barrière active est limitée par rapport à celle des déchets car l'expérience montre que, d'une part, les niveaux drainants peuvent se colmater avec le temps, et que d'autre part les géomembranes vieillissent et peuvent présenter des ruptures de natures diverses. La barrière passive sera donc sollicitée.

La figure n°3 illustre les prescriptions à respecter en termes d'isolement hydraulique du site de stockage par rapport à son environnement immédiat.

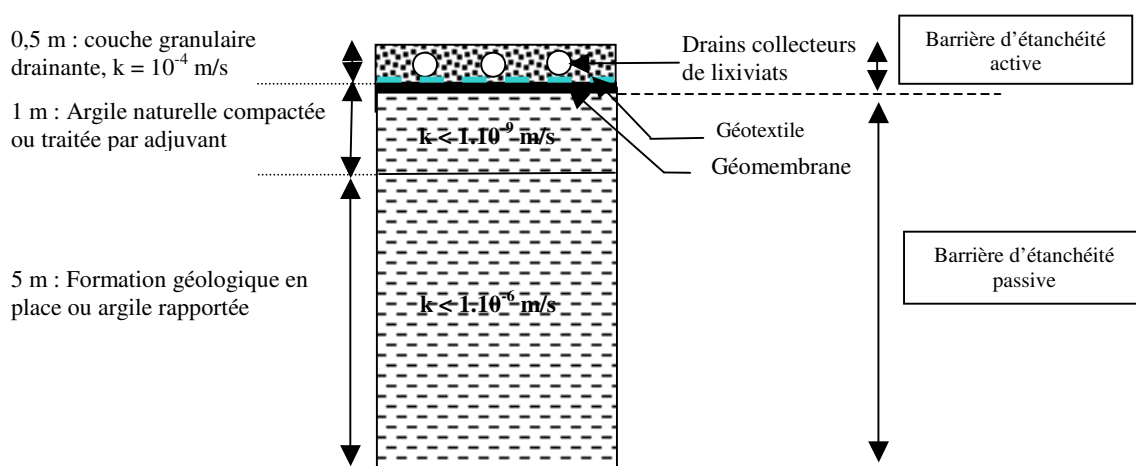


Figure n°3: Schéma réglementaire du dispositif d'étanchéité d'un centre de stockage de déchets de classe 2.

I.3 – Description

I.3.1 – Barrière d'étanchéité active

Elle est constituée successivement de haut en bas, d'un système de collecte et de drainage des lixiviats, d'un géotextile de protection et d'une géomembrane. Son rôle est de préserver la barrière d'étanchéité passive des sollicitations, mais aussi d'isoler hydrauliquement les différents casiers du centre de stockage. Enfin, elle assure la collecte et l'évacuation des lixiviats.

I.3.1.1 - Systèmes de drainage actif des lixiviats

Réglementairement, la couche de drainage doit limiter la charge hydraulique des lixiviats sur la géomembrane à 0,3 m.

La technique utilisée consiste à mettre en place une couche granulaire drainante d'une épaisseur de l'ordre de 0,5 m directement au-dessus de la géomembrane et d'une perméabilité supérieure à 1.10^{-4} m/s. La collecte des lixiviats est assurée par un réseau de drains mis en place dans la couche granulaire. Leur évacuation est réalisée soit par un écoulement gravitaire dans un ou plusieurs collecteurs, soit par pompage à travers un regard dans une fosse d'accumulation placée au point bas du casier. La mise en place de la couche de drainage est en grande partie responsable des défauts d'étanchéité recensés avant la phase d'exploitation du site (Cf. Partie II.3.3).

I.3.1.2 - Géotextiles de protection

Un géotextile de protection est installé directement au-dessus de la géomembrane. Un autre est très souvent mis en place sous cette dernière mais aucune réglementation ne l'impose (Cartaud, 2004). Ils limitent l'apparition de défauts au niveau de la géomembrane notamment au moment de la mise en place de la couche granulaire de filtration sus-jacente ou de la compaction de la première couche de déchets. Cependant, n'ayant qu'une fonction de protection et non d'étanchéité, la durabilité de ces matériaux ne sera pas étudiée dans le cadre de ce travail.

I.3.1.3 - Géomembranes

La barrière d'étanchéité active prévue pour le projet de Saint-Escobille sera équipée d'une géomembrane en PEHD (Polyéthylène Expandé Haute Densité) d'une épaisseur de 2 mm.

Les géomembranes sont des produits apparus dans les années 70 pour remplacer les systèmes d'étanchéité moins souples et plus lourds. Elles sont généralement composées de PEHD pour leur installation au fond des sites de stockage. La réglementation française n'impose pas l'utilisation de géomembranes en PEHD mais elles présentent un avantage économique déterminant. Les géomembranes commercialisées actuellement sont des produits manufacturés sous formes de lés conditionnés en rouleaux et en nappes.

Les géomembranes en PEHD, obtenus par polymérisation de l'éthylène (résine), possèdent une structure semi cristalline. La résine est constituée par une fraction cristalline (en générale de l'ordre de 40 %) et une fraction amorphe inorganisée. Le taux de cristallinité peut varier selon les conditions de fabrication et les caractéristiques de la résine.

Les géomembranes sont des produits minces qui possèdent de bonnes caractéristiques en terme de résistance aux agressions physiques, chimiques. Cependant, même si les

mécanismes de dégradation sont connus, les scientifiques ne possèdent aucun recul sur le comportement à long terme des géomembranes en PEHD en contact avec des lixiviats et soumises à de nombreuses sollicitations (Cf. Partie II.3.2).

Les PEHD sont sensibles à la fissuration sous contrainte en présence de certains agents. L'oxydation (thermo-oxydation, photo-oxydation, oxydation chimique) est le principal mécanisme de dégradation de nature chimique en affectant l'intégrité des molécules de polyéthylène. Une stabilisation adéquate impliquant l'ajout d'additifs tels que les antioxydants ou des stabilisateurs UV permet juste d'améliorer la durabilité des géomembranes mais en aucun cas de garantir leur étanchéité sur le long terme.

I.3.2 – Barrière d'étanchéité passive

La barrière passive est destinée à garantir l'étanchéité des casiers en cas de défaillance de la barrière de sécurité active sous laquelle elle se trouve. Pour les installations de classe II, elle est au minimum constituée de bas en haut par 5 mètres de matériaux présentant une perméabilité inférieure à 10^{-6} m/s, et 1 mètre de matériaux présentant une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s (Cf. Figure n°3).

Les différentes solutions pour la constitution d'une barrière minérale peuvent être regroupées en deux catégories : les sols naturels et les sols rapportés, renforcés ou non par des géosynthétiques bentonitiques (Cf. Ci-après).

Dans les deux cas, cette barrière est mise en œuvre à partir de sols sédimentaires ou d'altérations contenant une forte proportion de minéraux argileux ou de sols auxquels sont appliqués un traitement par adjonction de minéraux argileux, tels la bentonite ou la kaolinite. Le matériau argileux est ensuite compacté de manière à obtenir une couche de sol de densité maximale et une faible conductivité hydraulique.

Une autre solution consiste à renforcer ou à remplacer une partie de la barrière minérale par un géosynthétique bentonitique.

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont des produits manufacturés sous forme de nappe dans laquelle une couche de bentonite est comprise entre deux lames de géotextile. La bentonite est l'élément principal des GSB puisqu'elle leur confère leur fonction essentielle, l'étanchéité, alors que les autres composants ont pour objet de donner une tenue mécanique au matériau et en constituent le squelette. Les GSB assurent leur fonction d'étanchéité uniquement après hydratation et confinement.

La bentonite est l'appellation commerciale d'une argile constituée essentiellement de montmorillonite, minéral siliceux formé de feuillettes. La bentonite sodique, grâce à la présence de son cation échangeable Na^+ , possède un très fort potentiel de gonflement en présence d'eau (18 fois son volume initial). Cependant, les propriétés de la bentonite se révèlent vulnérables à l'action chimique des lixiviats rencontrés dans le fond des décharges (Cf. Partie II.1.1).

I.3.3 – Notion d'équivalence d'étanchéité

L'arrêté du 9 septembre 1997 (modifié le 31.12.2001 et le 19 janvier 2006) relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés précise (Art. 11) que lorsque la perméabilité naturelle du substratum ne répond pas aux exigences réglementaires, des mesures compensatoires pourront être proposées par l'exploitant pour assurer un niveau de protection **équivalent**. L'équivalence entre deux barrières est atteinte lorsque les concentrations maximales induites dans les eaux souterraines sont les mêmes.

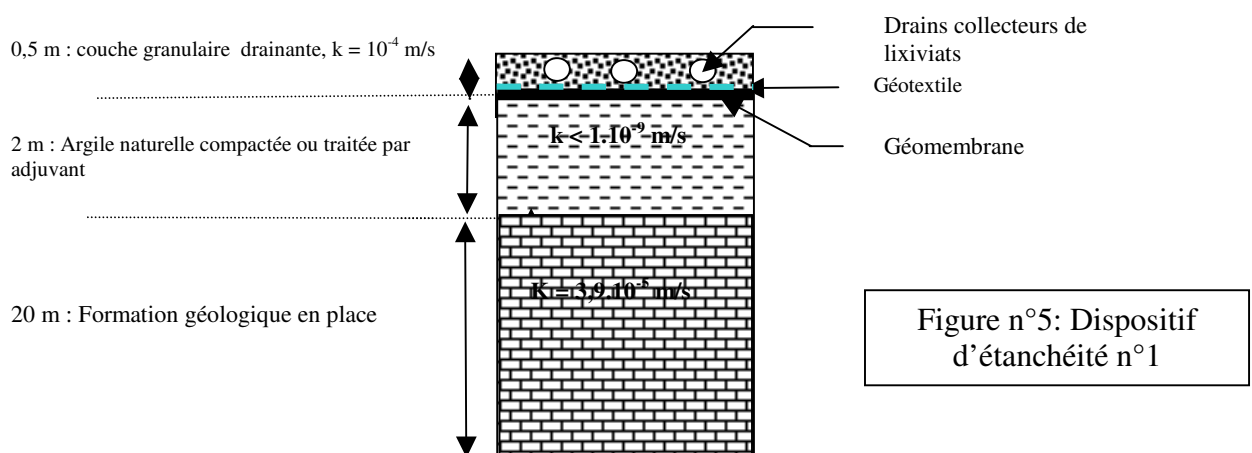
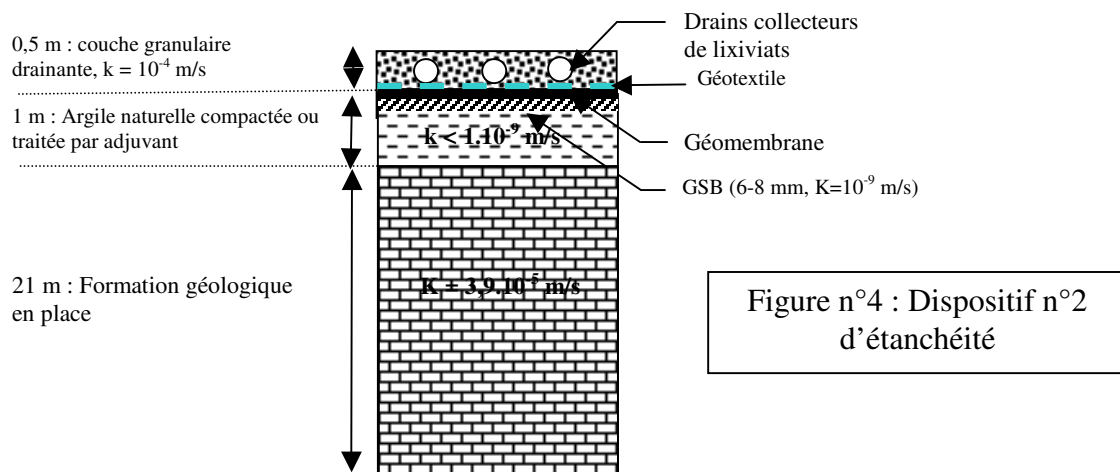
Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont couramment employés en complément et dans certains cas en substitution partielle des barrières minérales argileuses placées

directement sous la géomembrane. Comme indiqué dans le guide « Equivalence » du ministère chargé de l'environnement [MEDD, 2001], ce dernier cas doit se limiter aux situations où la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine est limitée et le risque de contamination réduit par le contexte hydrogéologique et géologique local.

L'article 10 stipule que « l'épaisseur de la barrière ainsi reconstituée ne doit pas être inférieure à 1 m pour le fond de forme et à 0,5 m pour les flancs jusqu'à une hauteur de deux mètres par rapport au fond... ».

Ce principe d'équivalence va être utilisé dans le cadre du centre d'enfouissement technique de Saint-Escobille. En effet, les études géologiques confirment la stratigraphie attendue : une couche superficielle associée à un faciès limono-argileux, puis les calcaires de Beauce et d'Etampes, sur une épaisseur d'environ 25 m et enfin les sables de Fontainebleau. Selon l'étude de faisabilité géologique, hydrogéologique et géotechnique remise par le cabinet d'études SAFEGE, la perméabilité des calcaires de Beauce est déterminée à $3,9 \cdot 10^{-5}$ m/s, ce qui est supérieur aux valeurs réglementaires. De plus, cette valeur ne semble pas sécuritaire puisqu'elle ne tient pas compte du caractère karstique des formations calcaires présentes à l'aplomb du site.

Deux dispositifs d'étanchéité équivalents sont proposés par les experts en charge de l'étude géotechnique de ce projet (FAIRTEC, ANTEA et SAFEGE). Ces derniers sont présentés dans les schémas suivants :



Les techniques mises en œuvre dans les centres de stockage de déchets ont considérablement évolué ces dernières décennies. La réglementation qui se doit de garantir la sécurité sanitaire et environnementale a elle aussi été complétée par de nombreux textes et dispositions. Cependant, les centres de stockage de déchets continuent à faire peur et à susciter légitimement une foule d'interrogations aux riverains de tels projets.

La science joue un rôle prépondérant dans la connaissance et la maîtrise des risques générés par de telles installations. Ces risques sont connus et résident essentiellement dans la contamination des eaux superficielles et souterraines par les lixiviats et la pollution atmosphérique due aux biogaz. Divers programmes de recherches ont été lancés récemment notamment par le Cemagref, l'INERIS, l'ADEME, le BRGM, les Agences de l'eau, pour tenter de lever un grand nombre d'incertitudes scientifiques. Il apparaît entre autre que le manque de recul par rapport aux nombreuses sollicitations subies par les barrières d'étanchéité ne permet pas de prévoir leur durabilité et de garantir à long terme leur efficacité pour prévenir l'infiltration des lixiviats. Nous allons donc aborder une étude la plus exhaustive possible des différentes sollicitations des barrières d'étanchéité. Cette étude s'appuie sur des travaux de recherches récents mais aussi sur des comptes rendus de séminaires des professionnels des centres d'enfouissements. Elle doit montrer, de manière objective, que les techniques réglementaires de confinement utilisées dans ces ouvrages sont vulnérables et que leur évolution sur le moyen et long terme n'est pas maîtrisée.

II – Mise en évidence de la vulnérabilité des barrières d'étanchéité: Synthèse bibliographique

II.1 – Les sollicitations de la barrière minérale passive

Les sollicitations des géosynthétiques bentonitiques (GSB) en fond d'installation de stockage de déchets sont multiples et comparables à celles d'une barrière argileuse classique. Néanmoins, leur faible épaisseur nécessite une attention plus stricte. Nous allons aborder ce thème selon une description commune pour les deux types de matériaux. Certaines dispositions spécifiques à l'un ou l'autre seront précisées le cas échéant.

II.1.1 – Sollicitations chimiques

Les géosynthétiques bentonitiques qui constituent le fond des centres de stockage de déchets sont soumis à la charge ionique élevée des lixiviats en cas de fuite à travers la géomembrane. Fairlough et al. (2002) ont abordé le problème de l'influence des échanges cationiques sur les performances d'étanchéité des GSB au contact de lixiviats. Ainsi, la substitution des ions sodium par des ions calcium dans la structure des argiles après un contact prolongé avec des solutions salines telles que les lixiviats conduit à une augmentation, sous certaines conditions de contrainte, du coefficient de perméabilité (donc de la capacité du matériau à laisser passer l'eau).

N. Touze-Foltz et C. Duquennoi montrent que l'échange cationique a un effet sur les propriétés mécaniques de la bentonite. Ainsi, une augmentation de la concentration en calcium au sein même du matériau, induit un ramollissement de la bentonite, rendant potentiellement les GSB plus sensibles à une réduction d'épaisseur et au poinçonnement. Le flux qui traverse le matériau peut donc s'accroître.

Par ailleurs, la bentonite possède des propriétés de gonflement importantes au contact de solutions aqueuses qui lui confèrent un pouvoir de cicatrisation rapide au droit de la fuite due à un défaut de la géomembrane. Cependant, les mêmes auteurs mettent en évidence que ces pouvoirs de gonflement peuvent être fortement affectés, et de manière définitive, par un contact direct avec un lixiviat de décharge.

L'altération des performances hydrauliques des argiles dues aux interactions chimiques avec les lixiviats trouve aussi son origine dans :

- L'altération de la structure de l'argile due aux influences sur la double couche diffuse,
- La dissolution des constituants de l'argile par les acides ou les bases pures,
- Les acides provoquent la floculation et attaquent la structure cristalline, spécialement la couche octaédrique (organisation des atomes constitutifs de la silice) des argiles,
- Les bases provoquent une dispersion et attaquent la couche tétraédrique des argiles.

II.1.2 – Sollicitations thermiques

Les réactions fortement exothermiques de dégradation de la matière organique contenue dans les déchets génèrent des températures extrêmes auxquelles sont soumis les géosynthétiques bentonitiques et les argiles en fond de décharge (de l'ordre de 60°C). Cette source de chaleur intense provoque un gradient thermique important avec la barrière minérale

et le sol sous-jacent. Dans le cas d'un gradient thermique, l'humidité migre de la source de chaleur vers les zones plus froides. Cependant, la barrière étant recouverte d'une géomembrane imperméable, il n'y a pas d'alimentation possible par le haut, dans le cas d'une géomembrane non endommagée à l'endroit considéré. C'est donc l'humidité de la barrière d'argile qui va migrer et provoquer sa dessiccation (Rowe, 1998 - Philip et al. 2002). Cette baisse de teneur en eau d'un sol argileux produit un retrait volumique qui se caractérise par l'apparition de fentes de dessiccation. Selon Southern et al. (2002), les problèmes de dessiccation de la bentonite peuvent conduire dans certaines conditions à une augmentation très importante de la perméabilité des GSB qui peut-être irréversible en cas de contact avec un lixiviat.

De même, des phénomènes de combustion interne apparaissent fréquemment au sein des massifs de déchets comme en témoigne les professionnels des centres de stockage (L. Riquier, Géolia, SITA, 2004). Ces incendies peuvent générer des instabilités au sein du massif de déchets modifiant ainsi les états de contraintes au niveau des dispositifs d'étanchéité. Par ailleurs, la chaleur dégagée par ces foyers de combustion peut entraîner la dessiccation de l'argile sous-jacente et des écoulements préférentiels. Enfin, les émissions de gaz sont toxiques et les biogaz voient leur quantité et leur composition modifiées.

II.1.3 – Sollicitations mécaniques

Les sollicitations mécaniques des géosynthétiques bentonitiques sont principalement le poinçonnement, les tassements différentiels en fond et le cisaillement sur les flancs. Ainsi, Stark (1998) a mis en évidence la forte susceptibilité des géosynthétiques bentonitiques à la réduction d'épaisseur sous sollicitations mécaniques par rapport aux argiles compactées. La migration de bentonite par fluage (déplacement latéral) au sein même du GSB peut conduire, par poinçonnement ou par simple variation locale de contrainte normale, à la création, à plus ou moins long terme, de secteurs d'épaisseur réduite conduisant à des flux liquides plus importants et à une réduction de la résistance chimique. Les phénomènes de migration de bentonite sont plus particulièrement favorisés par la présence de plis dans la géomembrane successifs à une exposition prolongée au rayonnement solaire. Par ailleurs, Touze-Foltz et Duquennoy ont montré que l'échange ionique au niveau des GSB entraîne une augmentation de leur sensibilité au poinçonnement.

II.2 – Vulnérabilité liée aux caractéristiques des matériaux et à leur mise en œuvre

La réglementation impose que la conductivité hydraulique de la barrière minérale argileuse soit inférieure à 10^{-9} m/s sur 1 m d'épaisseur.

Le compactage de l'argile de la barrière passive est effectué à la teneur en eau optimale (déterminé en laboratoire) et en supposant un état saturé qui permet d'obtenir une densité sèche maximale et une perméabilité minimale. Cependant, si un sol argileux semble pouvoir répondre à ce critère hydraulique assez couramment à petite échelle sur des essais de laboratoire, obtenir une barrière minérale de conductivité hydraulique conforme à la réglementation est techniquement plus délicat sur site (à grande échelle). Ainsi, lorsque l'argile est compactée à une teneur en eau trop importante ou que l'énergie de compactage est appliquée de façon inadéquate, la barrière minérale à l'issue des travaux est de qualité insuffisante. La surface présente un aspect matelassé et les propriétés mécaniques telles que la portance, la compressibilité, la résistance aux sollicitations mécaniques en cisaillement sont réduites. Par ailleurs, les études montrent que le degré de saturation des massifs d'argiles

utilisés dans la plupart des ISD (installation de stockage des déchets) est de l'ordre de 80% (Bracci et al. 1993 et Touze-Foltz, 2001) et ne doit probablement jamais atteindre la saturation totale supposée initialement. La recherche bibliographique montre que les études concernant l'interaction entre les lixiviats et les argiles de la barrière passive sont peu nombreuses.

Dans la pratique et pour simplifier leur mise en oeuvre, les GSB ne sont pas préhydratés, laissant à l'eau de pluie, à l'eau souterraine ou à d'autres fluides (lixiviats) le soin de s'en charger, avec l'incertitude que cela induit sur la conductivité hydraulique obtenue.

II.3 – Les sollicitations et vulnérabilité de la barrière synthétique active

Le tableau n°I résume les différentes contraintes subies par les dispositifs d'étanchéité et de drainage par les géosynthétiques (DEDG).

Tableau : Niveaux de contraintes pouvant agir sur les D.E.D.G. de C.S.D. selon leur localisation

Contraintes	Fond	Talus	Couverture	
			penne < 5 %	penne > 5 %
Chimiques/biologiques	xxx	xx	xx	xx
Mécaniques				
-Tassements différentiels				
* Court terme	x	x	-	-
* Long terme	xx	xx	xxx	xx
-Glissements	x	xxx	-	xx
-Poinçonnements				
*Court terme	xxx	xxx	-	-
*Long terme	xxx	xx	xx	xx
- Poids des déchets	xx	xx	-	-
Charge hydraulique	xx	-	-	-
Haute température	xx	xx	-	-
Gel/Dégel	x	xx	xx	xx
Ultraviolets	x	xx	x	x
Sous-pression (gaz, liquide)	x	xx	xx	xx
Vandalisme, rongeurs	x	x	xx	xx
Végétation	-	-	xx	xx
Conditions atmosphériques (avant stockage)	x	x	xx	xx

Tableau n°I : Niveau de contraintes pouvant agir sur les D.E.D.G de C.S.D selon leur localisation

L'ensemble de ces contraintes altère prématurément les propriétés mécaniques et hydrauliques des géosynthétiques. Il convient maintenant de préciser ces différentes contraintes pour appréhender leur importance sur la vulnérabilité des DEDG.

II.3.1 – Vulnérabilité du système de drainage des lixiviats et du géotextile de protection

Le problème essentiel des éléments de drainage est le risque de colmatage qui peut avoir lieu chimiquement (réaction chimique entre les éléments du lixiviat et le géosynthétique) ou biologiquement (par développement de micro-organismes). Le colmatage du système de drainage des lixiviats provoque une augmentation de la charge hydraulique au niveau des défauts de la géomembrane et par conséquent un accroissement de la sollicitation de la barrière passive sous-jacente (débit de fuite).

II.3.2 – Sollicitations de la géomembrane

II.3.2.1 - Sollicitations physico-chimiques

Dans le domaine de l'étanchéité des casiers ou alvéoles des centres de stockage de déchets, la résistance physico-chimique est le premier critère à prendre en compte pour s'assurer de l'adéquation entre la géomembrane et le produit à stocker (Lambert, 1997). Cette résistance peut être estimée par rapport à l'action des UV, de l'air, de la température et de liquides tels que les hydrocarbures, les acides, les lixiviats. C'est ce dernier facteur qui est le plus discriminant. Du fait de leur nature non polaire, les polyéthylènes sont très résistants aux agressions chimiques. Ils exhibent une très faible perméabilité à l'eau comme aux gaz et sont quasiment insolubles à une température inférieure à 60°C. Cependant, les températures atteintes dans les centres de stockage peuvent supérieures à 60°C (décomposition de la matière organique, combustion interne), ce qui les rend vulnérables aux agressions chimiques.

Si la phase cristalline est quasi-imperméable à l'infiltration de composés chimiques, la phase amorphe est quant à elle un peu plus sensible. En effet, le processus de diffusion moléculaire a lieu dans la zone amorphe de la géomembrane. Par exemple, les hydrocarbures halogénés comptent parmi les quelques composés chimiques susceptibles de dégrader sévèrement les polyéthylènes.

Certains autres composés, comme les huiles minérales, les hydrocarbures aromatiques et aliphatiques ou les agents fortement oxydants peuvent aussi affecter le polyéthylène lors d'expositions prolongées. Ces agents chimiques, rencontrés dans les lixiviats, peuvent provoquer le gonflement, la plastification et la micro-fissuration du polyéthylène. Les agents chimiques à potentiel oxydant élevé en forte concentration peuvent aussi provoquer la rupture de chaîne. La diffusion et l'extraction de certains types d'additifs peuvent aussi devenir problématiques pour certaines applications.

- L'exposition solaire :

Les géomembranes de couleur noire s'échauffent lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Cet échauffement peut engendrer des températures à la surface des géomembranes souvent supérieures à 60°C (Pelte, 1993), et entraîner des déformations importantes. L'échauffement se traduit par la formation de nombreux plis (dilatation). A l'inverse, des températures trop basses provoquent une rétraction de la géomembrane s'accompagnant généralement d'un décollement de celle-ci au niveau des pieds de talus. Des déchirures en traction et en cisaillement peuvent alors se produire lors de la mise en charge du site.

Le PEHD est le matériau qui est le plus sensible au rayonnement solaire (Lambert, 1997). D'après Giroud et Morel (1992) la formation de plis gêne la soudure des géomembranes et crée un volume entre la géomembrane et son support. La présence de ce volume, qui peut être important sous la géomembrane, peut nuire à l'efficacité du dispositif d'étanchéité dans le cas où la géomembrane serait endommagée à ce niveau.

- Thermo-oxydation et photo-oxydation :

L'oxydation est le principal mécanisme de dégradation de nature chimique (affectant l'intégrité des molécules de polyéthylène). Une stabilisation adéquate impliquant l'ajout d'additifs tels que les antioxydants ou des stabilisateurs UV permet cependant d'améliorer sensiblement la durabilité des géomembranes (Comité Français Géosynthétiques – Rencontres Géosynthétiques 2006).

Selon Rowe (1998), la dégradation de la fraction organique du massif de déchets est fortement exothermique et entraîne des températures de l'ordre de 60°C. L'oxydation thermique du polyéthylène est initiée par l'énergie provenant d'une température élevée. Elle implique l'altération des liaisons moléculaires au sein des chaînes de polymère.

La thermo-oxydation débute avec une période d'induction pendant laquelle aucun changement significatif des propriétés du matériau n'est généralement observé. Puis, au fur et à mesure que l'oxydation du matériau se produit, une période dite d'accélération prend place, pendant laquelle le polymère réagit relativement rapidement avec l'oxygène et les éléments oxydants des lixiviats (Comité Français Géosynthétique, Rencontres Géosynthétiques 2006). Cette période correspond aussi au moment où les propriétés mécaniques du matériau commencent à diminuer.

La photo-dégradation est un procédé similaire à la dégradation thermique, cependant la source d'énergie induisant la dégradation provient du rayonnement ultra-violet plutôt que de la chaleur. Ce phénomène affecte donc les géomembranes essentiellement lors de leur exposition au rayonnement solaire pendant l'installation.

Les modifications de structures ainsi causées affectent les propriétés mécaniques de la résine, et sensibilisent également cette dernière à d'autres types de dégradations susceptibles de survenir ultérieurement, comme la fissuration sous contrainte.

- Fissuration sous contrainte

La fissuration sous contrainte consiste en la rupture fragile d'un échantillon de matériau mis sous tension, en présence d'un agent chimique accélérateur tel que les lixiviats. La déformation se produit sur une petite section et conduit à plus longue échéance à une rupture complète du matériau (Cf. figure n°5).

À l'échelle moléculaire, ce type de rupture se produit dans la phase amorphe du polymère. Un certain nombre de molécules de la phase amorphe établissent une liaison entre deux éléments cristallins voisins l'un de l'autre (Cf. figure n°5a). Lorsque ce polyéthylène est mis sous contrainte en présence d'un agent lubrifiant, une rupture par fissuration sous contrainte peut se produire : les molécules de liaison se trouvent étirées jusqu'à ne plus pouvoir assurer la liaison entre les deux lamelles cristallines qu'elles maintenaient ensemble, tel qu'illustré sur la figure n°5.

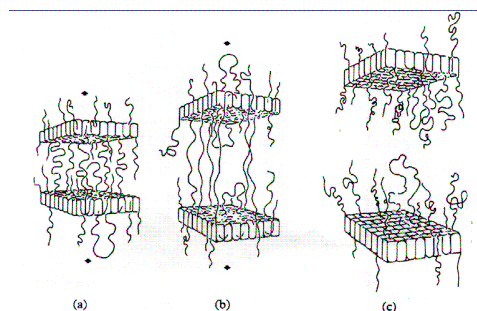


Figure n°5 : Illustration du mécanisme de rupture par fissuration sous contrainte : (a) lamelles de la phase cristalline liée par les molécules de liaison, (b) processus de séparation des phases, (c) propagation de la rupture entre les lamelles (d'après Lustiger et Markman, 1985).

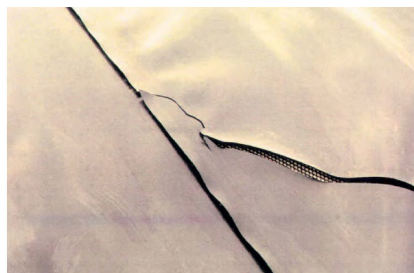


Figure 5. Rupture par fissuration sous contrainte d'une géomembrane

Figure n°6 : Rupture par fissuration sous contrainte.

Ce phénomène est semblable au « stress cracking », terme anglophone qui signifie la rupture d'un échantillon de géomembrane présentant un défaut sous l'action d'une contrainte et des lixiviats.

II.3.2.2 – Sollicitations mécaniques

Les géomembranes n'ont aucune fonction de renforcement mécanique. Cependant, au sein d'un ouvrage elles sont soumises à de nombreuses sollicitations mécaniques susceptibles d'affecter leur fonction d'étanchéité. Les sollicitations mécaniques peuvent être divisées en deux catégories plus ou moins interdépendantes : la première concerne les phénomènes de tractions, cisaillements et tensions subies par les géomembranes. La seconde regroupe les sollicitations par poinçonnement de la géomembrane lors de la mise en charge de l'ouvrage.

Les phénomènes de tractions, tensions et cisaillements sont résumés ci-après :

- ☞ Par la formation de plis, si la pose et l'ancrage de la géomembrane sont réalisés par temps chaud ou froid ;
- ☞ Si l'ancrage en tête de talus est mal réalisé ;
- ☞ Sous l'action de leur propre poids sur les grandes pentes ;
- ☞ Sous le poids des matériaux qu'elles sont censées contenir, comme les déchets (Pirron, 1998).

En ce qui concerne les plis, à la base de ces derniers ainsi qu'à leur sommet, existent des zones d'accumulations de contraintes mécaniques (contraintes en tension sur l'une des faces de la géomembrane et contraintes en compression de l'autre côté) qui provoquent des zones de faiblesses (fissuration sous contrainte correspondant à une rupture d'une partie de la structure du matériau). Ces endommagements microscopiques n'auront pas d'effets immédiatement visibles, il ne s'agit pas encore de défauts mais ceux-ci pourront apparaître plus tard lors d'autres sollicitations, mécaniques ou chimiques.

Elles peuvent également être soumises au poinçonnement. Deux types de poinçonnements sont à envisager : le poinçonnement statique et le poinçonnement dynamique.

Le poinçonnement dynamique est susceptible de se produire essentiellement lors de la mise en place de la géomembrane, par la chute d'objets, d'outils et par des chocs, directs ou par l'intermédiaire d'engins, avec les granulats. Le poinçonnement statique peut intervenir à court terme lors du passage d'engins, ou à long terme, lors de la mise en service de l'ouvrage. Les irrégularités du sol support et la couche granulaire drainante peuvent alors poinçonner la géomembrane soumise à une pression lithostatique et/ou hydraulique. La surface de la barrière minérale argileuse compactée sur laquelle repose la géomembrane n'est jamais parfaitement plane (Cartaud, 2004). Rowe en 1998 distingue deux sources primaires pour la

non planéité des surfaces de barrières compactées : les hétérogénéités liées à la distribution de la taille des particules du sol compactée et les ondulations et ornières provenant de la plasticité du sol. En effet, le compactage de la couche d'argile étant réalisé à une teneur en eau importante, le sol se trouve généralement proche de sa limite de plasticité. Les engins qui se déplacent sur la barrière laissent des traces à la surface de l'argile.

La traction ou le poinçonnement de la géomembrane peuvent conduire à la rupture de la continuité du matériau qui présente alors des endommagements.

La mise en oeuvre des géomembranes doit être faite avec précaution (Comité Français Géosynthétiques, 1998) pour ne pas endommager la géomembrane. E. Gaget (2005) a pu apprécier la mise en place de géomembranes, lors d'expérimentations dans une ISD et a remarqué que ces précautions ne sont pas systématiquement respectées. De plus, les rouleaux de géomembrane n'étaient pas toujours protégés des intempéries et du vandalisme, ce qui peut favoriser l'apparition de défauts lors de la pose.

Enfin, le déroulage de certaines géomembranes s'effectuait au godet de curage, ce qui provoquait des rayures profondes, voir des incisions, pouvant provoquer à posteriori des défauts majeurs.

Les contraintes mécaniques sont très importantes vis-à-vis du problème de la détermination des transferts advectifs dans les étanchéités composites de centres de stockage de déchets car elles peuvent être à l'origine de défauts de l'étanchéité sous la forme d'un percement de la géomembrane lors d'un poinçonnement, d'un déchirement lors d'une mise sous tension ou d'une fissuration sous contraintes à long terme.

II.3.2.3 – Cas particulier du tassement des déchets

Le tassement des déchets va être approché selon deux points de vue complémentaires. Le premier, relatif au cours terme prend place lors du compactage des déchets en phase d'exploitation. Cette étape indispensable garantie la rentabilité du projet en terme de capacité de stockage et assure une certaine cohésion au massif de déchets. Le second point de vue sera consacré aux conséquences des tassements différentiels à long terme qui apparaissent lors de l'évolution du massif de déchets et constituent des risques majeurs d'instabilité.

- Le tassement primaire à cours terme

Lors de leur arrivée sur site, les déchets sont déversés dans le casier de stockage du CSD en cours de remplissage. La mise en œuvre du déchet consiste d'abord à étaler celui-ci (après déversement) en fines couches de 30 à 80 cm d'épaisseur compactées à l'aide d'engins lourds (Cf. Figures n°7 et 8).

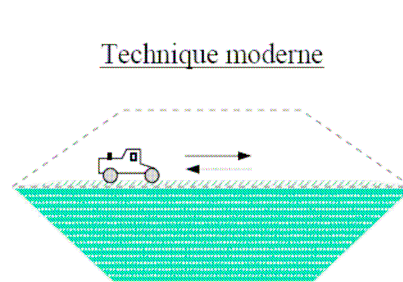


Figure n°7 : Illustration du tassement des déchets dans les casiers

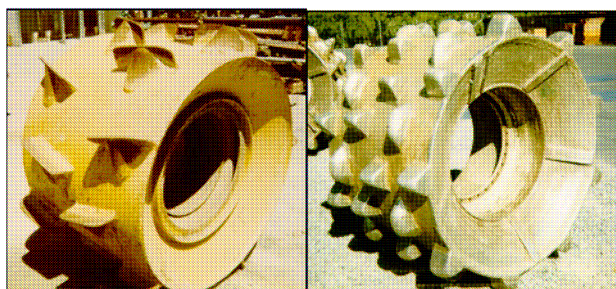


Figure n°8 : Roue d'un compacteur de déchets

Le tassement primaire des déchets entraîne des contraintes énormes au niveau des dispositifs d'étanchéité drainage en fond de casier, notamment lors de l'application des premières couches. Ces contraintes entraînent des sollicitations mécaniques au niveau de la géomembrane et l'apparition de défauts.

- Le tassement secondaire ou à long terme

Selon F. Olivier (2003), le tassement secondaire se produit au cours de plusieurs décennies, même au-delà des 30 ans de post-exploitation (Centre d'enfouissement Technique de Saint-Michel – Montréal, Québec - Canada). Ce tassement résulte de l'évolution mécanique, biochimique et physico-chimique du massif de déchets au cours du temps et se traduit par différents effets :

- Apparition de zones sèches par diminution localisée de la perméabilité. Il en résulte l'apparition de nappes perchées pouvant entraîner des instabilités et des hétérogénéités dans le massif de déchets.

- Apparition de tassements différentiels qui entraînent des déformations de la topographie en surface. Ces tassements différentiels génèrent des contraintes au niveau de la couverture étanche (Cf. Figure n°2) qui joue un rôle très important dans le devenir à long terme du site et sur son impact sur l'environnement. Ces déformations sont capables de fissurer la couverture minérale, poinçonner la géomembrane et rompre le système de drainage des lixiviats et des biogaz. Enfin des dépressions peuvent se créer sur la couverture du site de stockage entraînant une accumulation d'eau en surface (F. Olivier – 2003) – Cf. Figure n°9). Ces déformations atteignent en moyenne 15 à 20% sur une période de trente ans. Enfin, F. Olivier aborde le sujet du tassement des déchets au voisinage des talus (pentes) et précise que des cas de rupture de talus sont rapportés dans la littérature scientifique résultant de glissements survenus le long des barrières d'étanchéité drainage de fond et des interfaces déchets – nappes géosynthétiques. D'importants désordres peuvent également intervenir suite à la rupture du sol de fondation, à la rupture en traction des nappes géosynthétiques ou au glissement de la barrière de couverture.

Le guide méthodologique pour le suivi des tassements des centres de stockage de classe II, rédigé par l'ADEME (2005) montre que les propriétés mécaniques du matériau déchet (grande déformabilité) rendent peu réaliste l'application des critères traditionnels utilisés pour les études de stabilité en géotechnique. D'autre part, ce guide cite que la problématique tassements demeure trop souvent peu prise en compte par les exploitants de CSD et les bureaux d'études.



Figure 9. Illustration des tassements différentiels sur site (a) formation de dépressions sur la couverture de casier (b) apparition de points bas le long du réseau de drainage des biogaz (Source : ANTEA).

II.3.3 - Vulnérabilité liée aux caractéristiques des matériaux et à leur mise en œuvre

- Epaisseur des géomembranes

Compte tenu des contraintes économiques, l'épaisseur des géomembranes couramment utilisées dans les centres d'enfouissement est de l'ordre de 2 mm. Cette faible épaisseur, entraîne une sensibilité accrue au poinçonnement (Rencontres Géosynthétiques – 2003/2004). Par ailleurs, il est difficilement concevable d'avoir confiance en l'efficacité d'une fine pellicule de PEHD sollicitée par une montagne de déchets compactés journalièrement.

- Flexibilité

Les géomembranes en PEHD sont des matériaux peu flexibles qui nécessitent des conditions de mise en œuvre spécifiques pour ne pas créer des plis et par conséquent des zones de fragilités. Ainsi, E. Gaget a pu observer que contrairement aux préconisations, le transport des géomembranes s'effectuait sans palonnier, ce qui crée des plis. De plus, la rigidité prononcée de ce type de matériaux rend difficile la soudure des lés de géomembranes.

- Défauts de soudure

Lors de la pose, les lés de géomembranes sont soudés entre eux selon la méthode du double cordon qui consiste à emprisonner un film d'air entre deux lignes de soudures parallèles. Des défauts sont susceptibles de créer des fuites de lixiviats à ce niveau, malgré les tests d'étanchéité réalisés tout au long de l'installation.

Par ailleurs, ces zones chauffées sont sensibles à l'oxydation thermique et créent des zones de faiblesses soumises aux sollicitations. Il est par ailleurs reconnu (Haxo et Kamp, 1990) que les soudures peuvent ensuite céder sous l'action de forces de traction.

III – Les barrières d'étanchéité réglementaires: Une diffusion de la pollution dans le temps?

III.1 - Conséquences des sollicitations

III.1.1 - Défauts et endommagements de la géomembrane

Les différentes sollicitations présentées ci-dessus sont à l'origine de la formation de défauts dans les géomembranes. N. Touze, 2001 désigne sous le terme défaut une non continuité de la géomembrane entraînant un transfert advectif entre les deux faces de la géomembrane, quelle qu'en soit l'origine.

Par ailleurs, ces sollicitations couplées aux agressions physico-chimiques des lixiviats engendrent dans le temps, une diminution des propriétés mécaniques de la géomembrane et une sensibilité accrue à la formation de défauts. La géomembrane voit donc sa durabilité affectée par l'ensemble de ces sollicitations. Les auteurs s'accordent pour dire que le manque de retour et les nombreuses inconnues rendent imprévisible la durabilité de ce matériau. Nous savons simplement que le matériau le plus efficace économiquement parlant est le PEHD.

De manière synthétique, nous trouvons plusieurs types de défauts (Colucci et Lavagnolo, 1995) :

- ☞ Les trous circulaires liés à un poinçonnement local de la géomembrane ;
- ☞ Les défauts de soudure ;
- ☞ Les déchirures liées à la mise sous tension ou d'un défaut de soudure ;
- ☞ Les coupures et fissures par application d'une contrainte à long terme.

Après une enquête réalisée dans 11 pays depuis 1985, Rollin et al. (1999 - Canada) montrent qu'il faut compter en moyenne entre 15 et 20 défauts par hectare, ce qui est nettement supérieur à la moyenne habituellement considérée pour l'estimation des fuites, soit 5 défauts par hectare. Les travaux de N. Touze en 2001 suggèrent 12 défauts par hectare. Des études (Nosko et al, 1999) basées sur l'utilisation de méthodes de prospection électrique ont permis de mettre en évidence que la majorité des défauts dans une géomembrane n'apparaissent pas lors de sa pose (24 %), mais plutôt lors de la mise en place de la couche drainante granulaire (73 %), par poinçonnement. Ces études montrent donc que la géomembrane, avant le début de l'exploitation du site, présente des fuites. Ceci entraîne de nombreuses interrogations en termes d'évolution sur le long terme.

III.1.2 – Développement d'écoulements préférentiels au sein des matériaux argileux

Malgré la faible perméabilité des argiles, ces dernières, selon le degré de sollicitation hydraulique, mécanique, thermique, ainsi que la qualité de leur mise en œuvre, sont susceptibles de présenter des écoulements préférentiels qui peuvent, à plus ou moins long terme, favoriser le transfert des polluants vers la nappe sous-jacente.

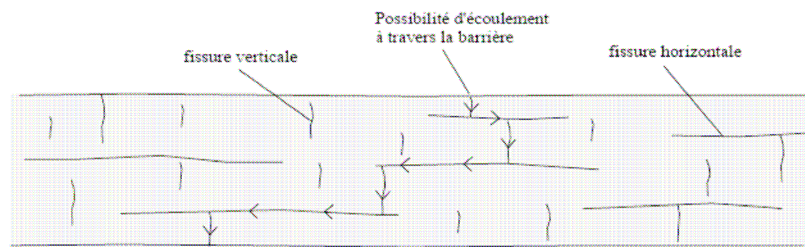


Figure n°10 : Schéma de possibles chemins d'écoulement préférentiel au sein d'une couche de matériau argileux.

La première raison relative à la formation de ces écoulements préférentiels que nous pourrions citer concerne l'hétérogénéité des matériaux argileux. Cette hétérogénéité peut-être naturelle, ou alors liée au mode de mise en oeuvre. La mise en oeuvre des matériaux par compactage (par couches successives), peut favoriser le développement d'interfaces qui constituent des chemins d'écoulements préférentiels. La présence de fissurations verticales (p.ex. des fentes de dessiccation qui se forment si une couche a été exposée au soleil sans protection pendant une durée trop longue) peut connecter ces interfaces (Cf. Figure n°10) et fournir des chemins d'écoulements qui constituent une connexion au travers de la barrière. D'autre part, ces écoulements peuvent trouver leur origine dans l'évolution à plus long terme des barrières argileuses par modification de leur teneur en eau.

III.1.3 – Modification de l'état hydrique des argiles et de ses propriétés

L'état hydrique de l'argile disposée en fond de casiers de stockage est susceptible d'être modifié au cours du temps par différents phénomènes :

- Fuites de lixiviats qui augmentent la teneur en eau de l'argile sous-jacente.
- Sollicitations thermiques qui diminuent localement la teneur en eau.
- Tendances vers un état d'équilibre à plus ou moins long terme de la barrière minérale avec le milieu environnant qui possède probablement un degré de saturation inférieur. (Rowe, 1998).
- Poids de la couche granulaire et surtout de la masse de déchets stockés qui engendrent des contraintes et des phénomènes de consolidation qui augmentent la teneur en eau globale de la couche (Cartaud, 2004).

Ces différents facteurs sont capables d'accroître ou diminuer la teneur en eau de la barrière d'argile compactée et donc de modifier ses propriétés d'imperméabilité. Ces processus coexistent, sont en compétition et certains de leurs effets peuvent s'annuler. Ils peuvent conduire à une hétérogénéité des propriétés hydrauliques de l'argile et mener à des écoulements préférentiels à travers la barrière. D'après Cartaud 2004, la science manque d'observations sur sites postérieures à une longue période d'exploitation et l'importance relative de leur impact sur l'état hydrique ne peut-être établie de manière objective. De même, N. Touze-Foltz, 2001, suggère l'existence d'une controverse scientifique sur l'état hydrique des couches d'argiles compactées.

III.2 - Mécanismes de fuite et de transfert des polluants vers le milieu naturel

Comme montré précédemment, les dispositifs d'étanchéité installés dans le fond des centres de stockage de déchets ne sont pas totalement imperméables. Ainsi, des polluants vont entrer en contact avec le sol argileux situé sous la géomembrane. La barrière passive ne fait alors que transférer dans le temps la pollution de l'aquifère sous-jacent, et ce malgré les propriétés de rétention des polluants de l'argile. Ce phénomène de rétention des polluants entraîne à long terme une pollution du sol en lui-même.

Le flux de pollution qui provient des lixiviats de décharge possède une composante advective et une composante dispersive-diffusive (lié à un gradient de concentration de part et d'autre du dispositif d'étanchéité). Le phénomène de transfert par diffusion suivant la loi de Fick (loi qui régit la diffusion ou la migration des espèces chimiques dans un milieu) concerne principalement les polluants de type composés organiques volatils (tels que les solvants chlorés, les hydrocarbures de la famille des benzènes, les dérivés phénoliques) et est relativement important à travers une géomembrane en PEHD en raison de sa faible épaisseur. Une barrière argileuse d'un mètre d'épaisseur est moins sensible à ce phénomène. Le transport advectif est lié à une différence de charge hydraulique de part et d'autre du dispositif d'étanchéité et suppose l'existence d'un défaut dans la géomembrane.

Les transferts que l'on retrouve à travers les systèmes d'étanchéité sont donc (Cartaud, 2004) :

- ☞ Un transfert advectif à travers les défauts de la géomembrane avec dispersion latérale du lixiviat dans l'espace existant entre la géomembrane et le sol sous-jacent appelé interface ;
- ☞ Un transfert diffusif à travers la géomembrane intacte; celui-ci a lieu dans les zones pour lesquelles il n'y a pas d'écoulement de lixiviat à l'interface. En effet, c'est dans ces zones que la concentration des contaminants va être différente de part et d'autre de la géomembrane et donc que des transferts diffusifs vont pouvoir se produire ;
- ☞ Un transfert advectif-diffusif à travers le GSB et la barrière argileuse.

La notion d'interface entre la géomembrane et le sol sous-jacent revêt une grande importance en termes de transfert advectif des polluants. En effet, cette interface qui permet au flux de polluants de s'étaler et de s'étendre horizontalement crée une grande surface offerte à l'infiltration. L'infiltration ne se fait donc plus à l'aval immédiat du défaut, mais sur une zone beaucoup plus importante.

III.3- Les incertitudes scientifiques, les études d'impacts et le principe de précaution

Des modèles mathématiques permettent de déterminer les concentrations maximales en polluants atteintes dans la nappe de l'aquifère, à l'aval hydraulique immédiat du site de stockage. Leur détermination repose notamment sur l'estimation du débit de fuite engendré par un défaut au niveau d'une géomembrane installée dans les conditions recommandées. Intervient aussi le nombre de défauts de la géomembrane après la mise en place de la couche granulaire drainante (d'après N. Touze (2001) estimé à 12 défauts par hectare) et la surface du site qui permet d'extrapoler le débit d'un défaut à l'ensemble de la zone de production des lixiviats.

Pour être valable en termes d'évaluation du risque, les modèles doivent se placer dans des conditions majorantes. Les modèles vont dans ce sens en ne tenant pas compte de la rétention des polluants au sein de la barrière argileuse mais aussi de leur dégradation dans le sol.

Cependant, ils ne tiennent pas compte du manque de recul par rapport au comportement sur le long terme des dispositifs d'étanchéité. Ainsi, c'est le nombre de défauts estimés à la pose de la géomembrane (12 à 15 / Ha) qui détermine, sur le long terme, le débit de fuite sollicitant la barrière argileuse. Mais comment garantir que le nombre de défauts n'augmente pas dans le temps durant la phase d'exploitation et que ce débit ne grossit pas compte tenu du vieillissement des géomembranes? Les défauts initiaux soumis aux sollicitations physico-chimiques des lixiviats et aux contraintes mécaniques de la masse de déchets, sont voués à prendre des dimensions importantes avec le temps. Par ailleurs, ne sont pas pris en compte les écoulements préférentiels qui peuvent se créer au sein même de l'argile. De plus, la charge hydraulique utilisée pour la détermination du débit de fuite unitaire à travers la géomembrane est la valeur réglementaire de 0,3 m. Les calculs ne prennent pas en compte le colmatage possible du système de drainage des lixiviats qui peut entraîner une surcharge hydraulique. Enfin, les géosynthétiques bentonitiques qui voient globalement leurs propriétés diminuées dans le temps, peuvent-ils être considérés comme des dispositifs de renforcement ?

Les lacunes scientifiques et la dégradation des barrières d'étanchéité n'apparaissent pas dans les calculs d'équivalence et d'évaluation des risques. Certes, la quantité de variables mises en jeu dans ce type d'évaluation est colossale et le manque de connaissances rend difficile leur compensation dans les modèles, mais le but de la réglementation est d'utiliser les connaissances scientifiques de manière rationnelle et objective pour garantir la sécurité des citoyens et de l'environnement sur le long terme. Ces incertitudes scientifiques semblent être volontairement écartées de manière à satisfaire aux exigences réglementaires au détriment du principe de précaution.

Depuis 2000, l'union européenne a des principes bien établis sur lesquels elle a fondé son approche de la gestion des déchets. Le principe de précaution stipule que « nous devons anticiper les problèmes potentiels en tenant compte des incertitudes actuelles ». Les expériences du passé en termes de stockage de déchets montrent bien que nous ne prenons pas assez de mesures pour prévenir les risques. En effet, il y a seulement une vingtaine d'années encore, le stockage des déchets se faisait de manière sauvage et incontrôlée. La conception des centres d'enfouissement doit donc intégrer ces incertitudes de manière à respecter ce principe de précaution et assurer un niveau de protection fiable dans le long terme. Les centres de stockage de déchets sont soumis à de nombreux aléas qui remettent en cause leur efficacité.

III.4 – La durabilité des dispositifs d'étanchéité : Un manque de garanties et de fiabilité

La durabilité des géomembranes en PEHD constitue une propriété critique lors de leur utilisation dans les centres d'enfouissement techniques. Or en Europe, les propriétés de produits décrites dans les spécifications ou certifications encore courantes se limitent généralement au contrôle des propriétés géométriques ou mécaniques, mais ne couvrent pas la durabilité (Rencontres Géosynthétiques – 2006).

L'apparition des normes d'application NF EN 13361, NF EN 13491 et NF EN 13492 en 2005 constitue un bond en avant dans la direction de la maîtrise de la durabilité des géomembranes. Cependant, il paraît essentiel d'améliorer les exigences relatives aux fréquences de contrôle de la durabilité lors du processus de fabrication, la formulation actuelle semblant trop laxiste, du point de vue scientifique (Rencontres Géosynthétiques – 2006).

Divers auteurs s'accordent pour écrire que dans le cas des fonds d'installations de stockage de déchets, aucun retour d'expérience en vraie grandeur n'est disponible. Les combinaisons de sollicitations auxquelles sont soumis les GSB et les géomembranes en PEHD (chimique, mécanique, thermique), leur faible épaisseur et l'absence de recul sur les performances à long terme, conduisent à de nombreuses interrogations sur leur durabilité.

Les recherches menées au cours de la dernière décennie ont contribué à l'amélioration de la connaissance des produits et de leurs procédures d'installation. Cependant des interrogations demeurent quant à leur durabilité chimique et à la pérennité de leurs performances d'étanchéité. Les recherches doivent donc se poursuivre dans ce sens afin de fournir les garanties nécessaires à une utilisation plus large (Rencontres géosynthétiques 2003/2004).

III.5 – TROP d'incertitudes et de méconnaissances scientifiques

La bibliographie relative aux dispositifs d'étanchéité des centres de stockage de déchets met en évidence que de nombreuses incertitudes et méconnaissances scientifiques sont encore d'actualité. Ceci paraît léger compte tenu de l'impact sur le long terme que peut avoir l'enfouissement des déchets. Le but de ce paragraphe est donc de présenter quelques unes de ces anomalies mais ne se veut pas exhaustif.

Selon Jeanne Desplats et Caroline Lejeune (2002), peu d'études ont été effectuées sur les interactions lixiviats / GSB.

E. Gaget, 2005, suite à une synthèse bibliographique met en évidence un manque de connaissances en ce qui concerne les paramètres de transfert des différents constituants d'un lixiviat dans les GSB, principalement les coefficients de diffusion.

J. Mery (2005) écrit que les déchets ménagers subissent des évolutions bio-physico-chimiques qui dépendent de nombreux paramètres rendant la composition des lixiviats très difficile à prévoir dans le temps.

Franck Olivier (2003) dans sa thèse relative au tassement des déchets en CSD de classe II signale pour sa part que les interactions entre les déchets, les matériaux naturels (argile, graviers) et artificiels (géotextiles, géosynthétiques) sont marquées par un grand nombre d'inconnues. Il cite aussi que les données disponibles auprès des exploitants de CSD se révèlent insuffisantes ou inadaptées en regard des informations requises par la communauté scientifique pour jeter les bases d'une connaissance approfondie du matériau étudié. L'auteur montre aussi que les expérimentations menées en laboratoire ne reproduisent pas les conditions rencontrées dans les sites exploités et que des paramètres relatifs à la nature du déchet ou au climat n'ont pas pu être évalués à partir des seuls sites implantés en France.

III.6 – Une réglementation pour la protection de la santé et de l'environnement ?

Selon la réglementation, un site est géologiquement et hydrogéologiquement favorable lorsqu'il remplit certaines conditions de perméabilité. Avec la notion d'équivalence d'étanchéité, tous les sites deviennent potentiellement favorables à recevoir un centre de stockage de classe 2. La réglementation sous-entend que l'on peut installer n'importe où des CET puisque dans tous les cas on arrive à respecter les contraintes de perméabilité. L'impact minimum sanitaire et environnemental des centres d'enfouissement repose sur l'efficacité des barrières d'étanchéité alors que de nombreux doutes persistent quant à leur durabilité.

La définition du terme déchet ultime suscite aussi un problème de pertinence réglementaire qui semble couvrir plus des enjeux économiques que d'afficher une réelle volonté de réduire la quantité de déchets à enfouir. En effet, La loi du 1er juillet 2002, limitant

la mise en décharge aux « déchets ultimes », c'est-à-dire « qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux. » Nous sommes là devant un cas d'école de subordination de la loi à l'économie. Les conditions du moment veulent que plus de la moitié des déchets ménagers et assimilés (DMA) soient encore mis en décharge ou incinérés alors que les conditions techniques existent. Ce qui est dérangeant mais pas du tout étonnant, c'est que l'économique prime sur le développement durable ainsi que sur la santé des citoyens.

Le guide d'équivalence émis par le ministère de l'écologie et du développement durable en 2002 stipule que les critères de perméabilité et d'épaisseur s'appliquent difficilement à un milieu géologique dont la perméabilité est essentiellement liée à la présence des fractures. En milieu calcaire notamment, il sera nécessaire de s'assurer de l'absence de karst, même profond, en liaison avec les formations superficielles.

Comme indiqué dans le guide « Equivalence » du Ministère chargé de l'Environnement et du Développement Durable[MEDD, 2001], ce dernier cas doit se limiter aux situations où la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine est limitée et le risque de contamination réduit par le contexte hydrogéologique et géologique local. Ces dispositions ne sont pas respectées dans le cas du projet de Saint-Escobille. Il existe notamment un réel manque d'études concernant la karstification du massif calcaire.

III.7 - La détection des fuites : Un outil de prévention des risques ?

Il existe différentes méthodes pour la détection de fuites, elles se distinguent en deux grandes parties. Les premières sont effectuées lors de l'installation tandis que les secondes sont réalisables lors de la phase d'exploitation ainsi qu'à l'issue de cette dernière.

Les méthodes utilisées lors de la phase d'installation (électrique, spectrométrie et thermographie infrarouge) nécessitent souvent l'intervention de spécialistes (coûteux) et les variables mises en jeu sont nombreuses telles que le recouvrement, plis de la géomembrane, la conductivité des couches situées sur et sous la géomembrane. Ces méthodes nécessitent des conditions spéciales de mise en œuvre pour obtenir des résultats interprétables.

Par ailleurs, il n'existe pas de méthode simple et fiable permettant de diagnostiquer la présence de fuite dans la géomembrane lorsque cette dernière est recouverte de la couche filtrante. Il apparaît pourtant que la majorité des fuites est créée au moment du déploiement de cette couche.

En ce qui concerne la détection des fuites en phase d'exploitation et post exploitation, il n'existe pas une technique unique qui permet à la fois de localiser les défauts et de quantifier leurs impacts potentiels sur l'environnement en terme de fuite. Par ailleurs, elles nécessitent l'installation d'équipements spécifiques coûteux au moment de la création du site de stockage.

Les méthodes de détection des fuites apparaissent comme relativement peu efficaces et mal appropriées. En effet, il est certes important de caractériser les défauts de la géomembrane dans une démarche d'assurance qualité mais qu'en est-il de cette étanchéité dans le temps, après 10 ans d'exploitation et 20 ans de stockage. L'enjeu de la détection de fuite est là. Il est nécessaire de connaître l'efficacité à long terme de ces structures d'étanchéité, de pouvoir mesurer à la source et non dans la nappe, un défaut de ces dernières.

CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons abordé le principe du stockage des déchets en France et nous nous sommes attachés à décrire les différentes techniques de confinement utilisées. Nous avons vu ensuite une description, la plus exhaustive possible, des sollicitations subies par les dispositifs géotechniques de confinement. Enfin, à la lumière des paragraphes précédents, une synthèse a été rédigée de manière à caractériser la vulnérabilité des dispositifs de confinement qui sont les seuls écrans entre la nappe de la Beauce et la pollution complexe générée par les lixiviats du massif de déchets.

Il en résulte que les techniques mises en place, ont certes évoluées mais il n'en demeure pas moins un manque de recul sur leur comportement à long terme. La littérature scientifique est marquée par une absence de garantie sur la durabilité des dispositifs d'étanchéité et des incohérences marquent les études d'impacts.

Une quantité importante de paramètres plus ou moins dépendants régissent la stabilité, le comportement et la sécurité à long terme des sites de stockage. Ces derniers ne sont pas totalement maîtrisés et identifiés pour le moment. Les chapitres développés dans ce travail montrent aussi que la communauté scientifique aborde de très nombreux points qui suscitent des interrogations souvent déterminantes en termes de sécurité.

Par ailleurs, la réglementation relative à la conception des centres de stockage de déchets ne semble pas afficher une réelle volonté de protéger la santé publique et l'environnement. Elle apparaît plus comme un compromis orienté vers la nécessité de créer des capacités de stockage supplémentaires, et des intérêts économiques.

Il faut ajouter à cela un contexte sensible illustré par la nappe de la Beauce et son enjeu en terme de ressource en eau potable pour les populations et l'agriculture.

La zone choisie pour l'implantation du centre d'enfouissement technique est très proche de deux villages. La réglementation relative aux distances à respecter par rapport aux habitations est tout à fait inadaptée et invraisemblable lorsque l'on se rend sur le terrain.

Il devient urgent de mettre en place une politique cohérente et durable de gestion des déchets en France. La valorisation, le tri à la source, le recyclage doivent être encouragés par une communication efficace comme celle relative à la sécurité routière qui affiche des résultats probants. La réduction de l'enfouissement des déchets représente un enjeu primordial puisque ces centres suscitent de plus en plus de réticences. Les associations se développent et s'organisent efficacement pour lutter contre l'installation de ce type de projets totalement aberrants, dans le contexte de Saint-Escobille, d'un point de vue humain et environnemental.

BIBLIOGRAPHIE

Ademe, (2005). Guide méthodologique pour le suivi des tassements des centres de stockage de classe II.

ANTEA – Agence Paris Ile de France. (Mars et juillet 2006). Mission de tierce expertise de l'étude géologique et hydrogéologique du dossier d'impact du DDAE pour la création d'un futur CSDU à Saint-Escobille (91).

Bessièrès A. (2003). Compréhension du comportement hydraulique à différentes échelles des étanchéités composites d'installations de stockage des déchets. Mémoire de fin d'études Ecole des métiers de l'environnement de Rennes, Cemagref Antony, pages 26 à 40.

Bracci, G., Giardi, M., Paci, B. (1993). « Proposal of a standard procedure for quality control of clay liners ». Proceedings of the Sardinia 93 Conference, Cagliari, Italie, volume 1, 305-312.

Cartaud F. (2004). Modélisation des écoulements dans les interfaces des barrières d'étanchéité composites d'installations de stockage de déchets. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris, 272 pages.

Colucci, P., Lavagnolo, M.C. (1995). « Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners ». Proceedings of the Sardinia 95 Conference, Cagliari, Italie (2), pages 437-452.

Comité Français Géosynthétiques (1995). Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets, 53 pages.

Comité Français Géosynthétiques (1998). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par Géosynthétiques Bentonitiques, pages 50 et 51.

Comité français Géosynthétiques (2006), 6^{ème} colloque francophone. Géotextiles, géomembranes, produits apparentés. État de l'art Présentation de cas concrets d'utilisation : routes, tunnels, installations de stockage de déchets, bassins, pages 1 à 51.

Desplats J. Lejeune C. (2002). Etude du comportement d'un géosynthétique bentonitique soumis à une sollicitation en poinçonnement. Cemagref Antony, Université Paris 7, 54 pages.

Düllmann, H. et Eisele, B. (1993). The analysis of various landfill liners after 10 years exposure to leachate (L'analyse de divers revêtements de décharges après 10 ans d'exposition aux lixiviats). Congrès Géologie et confinement des déchets toxiques, Montpellier, 8-11 juin 1993, volume 1, pages 177 – 182.

Fairlough, C., McGill, P., Webb, N. (2002). The affect of calcareous permrants on the hydraulic flux of four clay system used in geosynthetic clay liners. *Proceedings of the International Symposium in Nuremberg*, Germany, 16-17 April 2002.

Gaget E. (2005). Etude des transferts et des échanges cationiques au sein des géosynthétiques bentonitiques des installations de stockage de déchets. Cemagref Antony, Ecole Polytechnique Université d'Orléans, 127 pages.

Giroud, J.P., Morel, N. (1992). "Analysis of geomembrane wrinkles". *Geotextiles and Geomembranes* (11), 255-276.

Glandier, S. (2002). Risques sanitaires liés aux fuites de lixiviats des centres de stockage de déchets ménagers et assimilés. Cemagref Antony, ENSP Rennes, 83 pages.

Gourc, J.P. et Olivier F. (2002). Quelques aspects de l'approche géotechnique des centres de stockage de déchets. Actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG), Nancy.

Grasland A. Dossier de synthèse n°4 – Les décharges d'ordures ménagères : un danger potentiel près de chez vous. Centre National d'Information Indépendante sur les Déchets, 4 pages.

Haxo, H.E., Jr & Kamp, C.L., 1990, Destructive Testing of Geomembranes Seams: Shear and Peel Testing of Seam Strength, *Geotextile and Geomembranes*, No. 9, pp. 369-404.

Haza, E. Touze-Foltz N. (2004). Rencontres Géosynthétiques 2003/2004, 5^{ème} colloque francophone. Comité Français Géosynthétiques, pages 85 à 95.

Lambert, S. (1997). "Les géomembranes." *Ingénieries – EAT* (11), 27-40.

Le Bozec A. La gestion des déchets ménager technologique ou préventive. Cemagref Rennes, 13 pages.

Lustiger, Markman (1985). Importance of tie molecules in preventing polyethylene fracture under long term loading conditions, *Proceedings 9th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, New Orleans, LA, Nov. 1985, pp. 132-140*

Maciejewski S. (2006). Stabilité sur pente des dispositifs d'étanchéité par géomembranes : Etude paramétrique et réalisation d'un outil d'aide au dimensionnement. CUST et Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand, 99 pages.

Mery J. (2005). Contribution à une gestion durable du risque environnemental du stockage des déchets ménagers et assimilés : l'évaluation du coût externe des fuites de lixiviat des décharges. Thèse de doctorat de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, pages 1 à 32, pages 49 à 70.

Ministère de l'écologie et du développement durable. (Juillet 2002). Guide de recommandations à l'usage des tiers-experts pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive de centre de stockage, 22 pages.

Nedellec V. Barneaud A. (Février 2005). Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans le cadre de l'étude d'impact d'une installation de stockage de déchets ménagers et assimilés. Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement, 125 pages.

Nosko, V. and P. Ganier (1999). Lessons learned from geomembrane failures detected using the sensos DDS technology. Lessons learned from geomembrane failures. J.P. Giroud Ed., 17 pages.

Olivier F. (2003). Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier de Grenoble I.

Pelte, T. (1993). Etude théorique et expérimentale de la fonction étanchéité et du comportement thermique des géomembranes. Thèse de doctorat, Laboratoire de Géologie et de Mécanique. Grenoble, Université J. Fourier – Grenoble I, 253 pages.

Pessel M. Prospection géophysique sur le site potentiel d'un CET - Imagerie Géoélectrique. Laboratoire d'interactions et dynamique des environnements de surface, Université de Paris Sud, 5 pages.

Philip, L.K., Shimell, H., Hewitt, P.J., Ellard, H.T. (2002). "A field-based test cell examining clay dessication in landfill liners". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* (35), pages 345-354.

Pirron, T. (1998). Mise au point d'une méthode de dimensionnement des dispositifs d'étanchéité par géomembrane vis à vis du poinçonnement. Rapport de stage, Antony, Cemagref, 146 pages.

Rollin, A. L., M. Marcotte, et al. (1999). Leak Location in Exposed Geomembrane Liners Using an Electrical Leak Detection Technique. *Geosynthetics'99*, Boston, Massachusetts, USA, Industrial Fabrics Association International, Roseville, USA, volume 2, 615-626.

Rowe, R.K (1998). Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. *Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, GA, USA, volume 1.

SAFEGE Ingénieurs Conseils. (Novembre 2002). Centre de Stockage de Déchets Banals - Commune de Saint-Escobille (91) – Faisabilité géologique, hydrogéologique et géotechnique. Pour SITA Ile-de-France, 55 pages.

SAUNIER TECHNA. Etude d'impact volume 2 CSDMA Alvéole communes de Bellac et Peyrat de Bellac (87), 122 pages.

SITA Ile-de-France. (2006). Centre de stockage de déchets banals – Projet de Saint-Escobille. SITA/Géolia/L. Riquier/ADEME. (2004). Caractérisation et localisation des phénomènes de combustion interne dans les installations de stockage de déchets ménagers et assimilés – caractérisation des techniques de détection – synthèse ». 16 pages.

Southen, J.M. & Rowe, R.K., 2002, Desiccation Behaviour of Composite Landfill Lining Systems Under Thermal Gradients, *Proceedings of the International Symposium IS Nuremberg 2002*, Nuremberg, Germany, pp. 265-274.

Stark, T.D. (1998). Bentonite migration in geosynthetic clay liners. *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics 1*, 315-323.

Thomas, S. (2000). Centres de stockage de déchets – Géomécanique des déchets et de leur couverture. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 327 p.

Touze-Foltz, N. (2001). Modélisation des transferts advectifs dans les étanchéités composites de centres de stockage de déchets. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris, pages 22 à 88.

Touze-Foltz N. (2003). Détection, localisation et contrôle des fuites dans les géomembranes. Environnement et Techniques n°223, pages 21 à 25.

Touze-Foltz, N. Duquennoi, C. (2006). Comportement hydraulique et mécanique d'un GSB en contact avec des lixiviats au sein d'une étanchéité composite. Rencontres Géosynthétiques 2006, Cemagref Antony, 8 pages.