

COMPLEMENTARITE DES SYSTEMES D'ETANCHEITE-DRAINAGE EN MATERIAUX NATURELS ET SYNTHETIQUES DANS LE CONFINEMENT DES DECHETS

Luc COURARD

Université de Liège, Institut du Génie Civil, Laboratoire des Matériaux de Construction
Quai Banning, 6,
B - 4000 LIEGE (Belgique)

Tél. : 32.4.366.93.50
Fax : 32.4.366.93.30
Email : Luc.Courard@ulg.ac.be

1. INTRODUCTION

La gestion des déchets constitue un défi majeur pour l'humanité en cette fin de siècle. Le développement que la société a connu durant ces cinquante dernières années a été tel que la nature n'est plus capable d'absorber et de digérer les déchets produits. Le recyclage, le réemploi, la régénération ou la valorisation énergétique sont donc des comportements qui visent à retarder le plus possible le moment où un objet devient un déchet.

Il restera néanmoins toujours des déchets que l'on qualifie d'*ultimes* et qu'il faudra stocker dans la nature.

La conception de systèmes d'étanchéité-drainage performants et efficaces permet de réduire l'impact des déchets ultimes sur l'environnement en créant une structure étanche et dont tous les lixiviats produits peuvent être drainés et traités dans des centrales de traitement appropriées. Ce n'est qu'à ce prix que nous pouvons garantir un environnement durable.

2. COMPLEMENTARITE DES MATERIAUX NATURELS ET SYNTHETIQUES DANS LES CENTRES D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUES

Par rapport au génie civil des ouvrages hydrauliques où sont mis en œuvre des géosynthétiques, les centres de confinement des déchets présentent quelques spécificités [3] :

- sollicitations mécaniques (tassements, ...);
- sollicitations chimiques (lixiviats, ...);
- production de biogaz;
- durée de service;
- difficultés d'intervention sur le fond de l'ouvrage après la phase d'exploitation.

Le but de la mise en œuvre d'un système d'étanchéité-drainage est de limiter l'interaction entre les déchets stockés et leur environnement, en assurant la séparation, la collecte, l'évacuation et éventuellement le traitement des fluides (liquides et gaz) produits par le confinement et le stockage.

La structure et la composition du système d'étanchéité-drainage seront fonction de l'implantation du site d'enfouissement technique, des caractéristiques du sol environnant, de la position de la nappe phréatique, de la nature des produits à stocker, ...

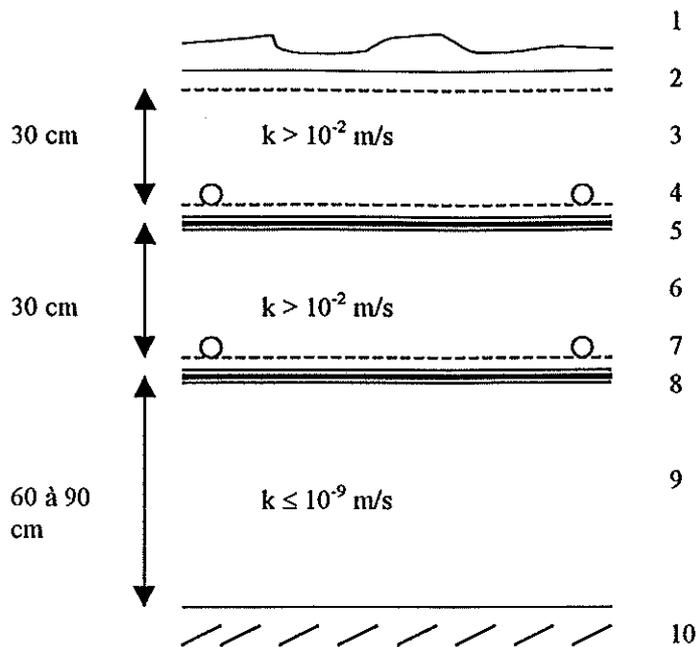
L'association argile-membrane offre des synergies intéressantes en terme d'étanchéité :

- Les lixiviats se trouvant sur une couche d'argile vont percoler au travers de cette étanchéité à une vitesse contrôlée par la conductivité hydraulique, la hauteur de lixiviat, la surface totale et la porosité. Ainsi, pour une couche d'argile de 5 m d'épaisseur et présentant un coefficient de perméabilité $k = 10^{-9}$ m/s, avec une hauteur de lixiviat de 0,3 m, on peut observer un débit de fuite moyen de 0,9 m³/ha/J.
- L'addition d'une membrane en contact direct avec la couche d'argile réduit la hauteur de lixiviat sur l'argile et donc le débit de fuite au travers du système, qui est maintenant contrôlé par la perméation au travers de la géomembrane.
- Si la géomembrane présente un défaut, le fait qu'elle soit en contact direct avec l'argile limite très fort le débit de fuite.

Par ailleurs, les argiles :

- sont peu sensibles aux endommagements mécaniques alors que les géomembranes le sont ;
- ont une faible perméabilité aux composés non polaires alors que les géomembranes ont une faible perméabilité aux composés polaires ;
- ont une perméabilité élevée aux gaz, contrairement aux géomembranes ;
- sont sensibles au dessèchement alors que les géomembranes y sont insensibles.

Connaissant les avantages présentés par les matériaux synthétiques et les matériaux naturels, il est possible de combiner couches d'argiles, géomembranes et géosynthétiques de façon à obtenir un « système » qui remplit les rôles d'étanchéité et de drainage.



- | | |
|---|---|
| 1. Déchets stockés | 6. Système secondaire de collecte des lixiviats |
| 2. Géotextile (filtration/séparation) | 7. Géotextile anti-poinçonnement |
| 3. Système primaire de collecte des lixiviats | 8. Géomembrane secondaire |
| 4. Géotextile anti-poinçonnement | 9. Argile compactée |
| 5. Géomembrane primaire | 10. Sol |

Figure 1 : exemple d'étanchéité combinée double géomembrane / matériau argileux

Dans un dispositif de ce type, la géomembrane supérieure et le système primaire de collecte des lixiviats ont pour objectifs de canaliser et de contenir les lixiviats. Le système primaire de collecte des lixiviats doit être dimensionné de manière à ce que la hauteur d'eau accumulée sur la géomembrane primaire ne dépasse jamais 30 cm à tout moment.

Le système primaire de collecte des lixiviats joue également un rôle important dans l'évacuation des eaux accumulées en fond de bassin lors du remplissage de la décharge. Il sert également de protection à la géomembrane primaire. La géomembrane secondaire ainsi que le dispositif secondaire de collecte des lixiviats servent de systèmes de confinement secondaire.

Le fonctionnement du système d'étanchéité double est basé sur le même principe que celui des coques de bateaux à double paroi. En effet, l'eau s'infiltrant au travers de la première paroi est pompée et évacuée avant de mettre la seconde paroi sous pression. L'efficacité d'un système d'étanchéité double est donc fortement dépendante de l'efficacité du système de drainage intermédiaire.

D'autres systèmes sont bien entendu utilisés, en fonction des conditions hydrogéologiques, du type matériau stocké, des pollutions potentiellement acceptables ou simplement du budget des travaux.

Tableau 1 : comparaison de structures d'étanchéité de couverture en fonction des contraintes [3]

Structure d'étanchéité	Climat			Tassement			Risques d'érosion			Percolation permise			Collecte des gaz		Pentes		
	Aride	Tempéré	Humide	Fort	Moyen	Faible	Fort	Moyen	Faible	Quasi nulle	Très peu	Modérée	Gaz	Pas de gaz	<9°	9°-18°	>18°
Matériau argileux compacté	1		3	1		3	1	2	3	1	2		1	1	5	4	3
Géomembrane	5	4	4	4	5	5	1	1	3	1	3	5	5	5	5	5	3
Géocomposite bentonitique	3	3	4	2	3	4	1	1	3	1	2	3	1	5	4	3	3
Géomembrane/ Matériau argileux compacté	2	3	4	2	3	4	3	4	4	3	4	4	3	5	5	3	2
Géomembrane/ Géocomposite bentonitique	5	4	5	3	4	5	2	3	4	3	4	5	4	5	5	3	2
Géomembrane/ Matériau argileux compacté/ Géomembrane	4	4	5	3	4	5	4	5	5	5	5	4	4	5	5	2	1
Géomembrane/ Géocomposite bentonitique/ Géomembrane	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5	4	4	5	5	3	2

Notes :

1 = non recommandé

2 = marginal

3 = possible dans certaines conditions

4 = acceptable

5 = recommandé

3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ARGILEUX

Les argiles, généralement sous forme de couches compactées, ont de tous temps été utilisées comme moyen d'imperméabilisation pour retenir l'eau des réservoirs ou, plus récemment, pour servir de barrière antipollution dans les centres d'enfouissement technique.

Le terme « argile » a d'abord un sens granulométrique : il désigne les particules fines du sol, dont la limite supérieure à 2 μm est généralement admise (Association Internationale de la Science du Sol). La deuxième caractéristique des matériaux argileux se situe au niveau de leur architecture structurale : ce sont des minéraux organisés en feuillets, chaque feuillet étant formé par la juxtaposition de couches de silice et d'hydroxyde sous forme tétraédrique ou octaédrique.

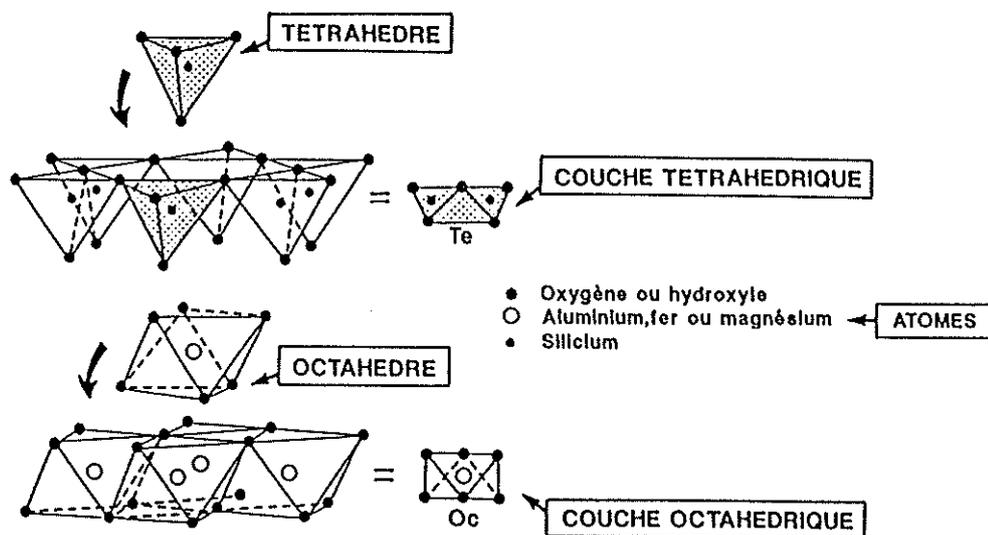


Figure 2 : architecture structurale de base des minéraux argileux

Les minéraux argileux simples sont constitués par l'empilement de feuillets de même composition. Il existe un large éventail de minéraux argileux dits interstratifiés avec des structures fondées sur l'empilement d'au moins 2 types de feuillets de composition différente.

Tableau 2 : caractéristiques des différents matériaux argileux [MITCHELL, 1976]

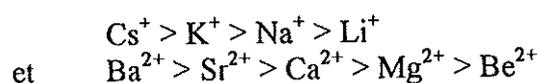
Groupe	Kaolinite	Illite	Smectite	Chlorite
Type	1/1 Te-Oc	2/1 Te-Oc-Te	2/1 Te-Oc-Te	2/2/2 Te-Oc-Te Te Te-Oc-Te
Cations (Oc-Te)	Al ₄ /Si ₄	(Al,Mg,Fe) ₄ (Al,Si) ₈	Al _{3,34} /Mg _{0,66} Si ₈	(Mg,Fe) ₆ (Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₈
Epaisseur unité structurale	7,2 Å	10 Å	9,6 Å	14 Å
CEC (meq/100g)	3-15	10-40	80-150	10-40
Surface spécifique (m ² /g)	10-20	65-100	50-120	
Limite de liquidité (%)	30-110	60-120	100-900	44-47
Indice de plasticité	25-40	35-60	50-100	36-40
Limite de retrait (%)	25-29	15-17	8,5-15	
Activité	0,5	0,5-1	1,7	

Une propriété fondamentale de ces matériaux réside dans la possibilité d'observer des substitutions isomorphiques d'ions dans la structure des feuillets de certaines argiles, ce qui a pour effet de créer des déficits de charges électriques qui doivent être compensés par des cations échangeables ou compensateurs. Ce phénomène induit un comportement particulier tant du point de vue chimique (rétention des ions), physique (rétention d'eau, gonflement), que mécanique (limites de liquidité et de plasticité).

La Capacité d'Echange en Cations (CEC) est la quantité de cations dans la double couche électronique susceptible d'être remplacée par d'autres cations présents dans la solution percolante.

Rappelons que l'eau est une molécule dipolaire avec des atomes disposés de façon asymétrique ; les molécules d'eau, ainsi que les cations qu'elles contiennent, sont attirées sur les surfaces chargées négativement des matériaux argileux. La zone constituée par la surface électronégative d'une part, l'eau et les cations d'autre part est nommée double couche électronique [7].

Certains cations en solution dans le fluide cherchant à traverser la couche d'argile sont échangés préférentiellement à d'autres avec la hiérarchie suivante :



De plus, l'affinité pour les cations bivalents prévaut sur celle des monovalents.

Conformément à la théorie de GOUY-CHAPMAN, l'échange de cations affecte l'épaisseur de la double couche électronique. Le remplacement d'un cation monovalent par un bivalent entraîne une réduction de la double couche, une répulsion/dispersion plus faible entre particules, une floculation plus forte et, finalement une augmentation plus forte de la perméabilité.

Le choix de l'argile nécessite notamment la prise en compte de ce phénomène dans la mesure où la composition des lixiviats est dans la plupart des cas connue partiellement et variable, voire complètement inconnue.

4. PROPRIETES DES MATERIAUX SYNTHETIQUES

4.1. Les géotextiles et produits apparentés

Ces produits sont amenés à remplir un certain nombre de fonctions, relativement à leur matériau constitutif et leur mode de fabrication.

Tableau 3 : fonctions principales assurées par les géosynthétiques élémentaires dans les centres d'enfouissement technique [3]

	Géotextile	Géoespaceur	Géogrille	Géoconteneur
Protection	X			X
Drainage	X	X		
Filtration	X			
Séparation	X			
Renforcement	X		X	X
Résistance à l'érosion	X	X		X

Les propriétés, pour lesquelles de plus en plus de normes européennes établies par le CEN TC 189 permettent de déterminer les valeurs expérimentales, sont bien entendu vérifiées pour et en fonction du type de fonction et de rôle.

Outre les rôles spécifiques de séparation et de renforcement, les fonctions liées au rôle hydraulique des géotextiles sont fondamentales pour assurer le fonctionnement correct et durable de la partie drainage du système d'étanchéité-drainage.

Les critères classiques de perméabilité et de filtration sont bien entendu applicables, tenant compte des sollicitations particulières d'emploi :

- Critère de perméabilité : $\psi > C k_s$,

où ψ = permittivité du géotextile (s^{-1})

C = coefficient de sécurité tenant compte de l'ouvrage dimensionné

k_s = coefficient de perméabilité du sol ou du drain granulaire sous-jacent (m/s).

Il est également important de définir une série de coefficients de sécurité sur le matériau synthétique lui-même de telle sorte que :

$$\Psi_{\text{permis}} = \Psi_{\text{ultime}} \left(\frac{1}{FS_{\text{col}} \cdot FS_{\text{fl}} \cdot FS_{\text{int}} \cdot FS_{\text{cc}} \cdot FS_{\text{cb}}} \right)$$

- où
- Ψ_{permis} = permittivité disponible
 - Ψ_{ultime} = permittivité mesurée en laboratoire
 - FS_{col} = facteur de sécurité pour le colmatage
 - FS_{fl} = facteur de sécurité pour la réduction des espaces vides par fluage
 - FS_{int} = facteur de sécurité pour l'intrusion des matériaux adjacents dans les géosynthétiques
 - FS_{cc} = facteur de sécurité pour le colmatage chimique
 - FS_{cb} = facteur de sécurité pour le colmatage biologique.

Ces facteurs peuvent être estimés à partir du tableau suivant [1].

Tableau 4 : coefficients de sécurité applicables aux géosynthétiques utilisés dans les systèmes d'étanchéité-drainage

Application	Coefficients de sécurité partielle				
	Colmatage	Fluage - vides	Intrusion	Colmatage chimique	Colmatage biologique
Filtre de drainage	2,0 à 4,0	1,0 à 1,5	1,0 à 1,2	1,2 à 1,5	1,2 à 1,5
Filtre pour contrôle d'érosion	2,0 à 4,0	1,0 à 1,5	1,0 à 1,2	1,0 à 1,2	1,2 à 1,5
Filtre pour collecte de lixiviats	2,0 à 4,0	1,5 à 2,0	1,0 à 1,2	1,2 à 1,5	1,5 à 3,0
Drainage gravitaire	2,0 à 4,0	2,0 à 3,0	1,0 à 1,2	1,2 à 1,5	1,2 à 1,5

– Critère de filtration : $O_f < \lambda_r d_{85 \text{ ou } 90}$

- où
- O_f = ouverture conventionnelle de filtration du géotextile
 - $d_{85(90)}$ = diamètre des particules du sol tel que 85 % (90 %) en poids des particules de ce même sol ont un diamètre inférieur à $d_{85(90)}$
 - λ_r = coefficient de proportionnalité.

Le coefficient de proportionnalité est déterminé en fonction des conditions de gradient hydraulique, du type de sol (lâche, dense, confiné), du coefficient d'uniformité, ... ; il varie généralement entre 0,1 et 2 suivant les normes nationales.

Le principal risque lié à cette fonction de filtration est le colmatage par les particules de sol ou les matériaux provenant des déchets et qui risqueraient de précipiter au sein du géotextile. Des essais spécifiques doivent être menés dans ce sens.

4.2. Les géomembranes

Le dimensionnement des géomembranes est basé sur un principe simple et fondamental : la membrane doit assurer la fonction d'étanchéité dans le système d'étanchéité-drainage, pendant un temps correspondant à la durée de vie estimée du centre d'enfouissement technique. Ce principe est rencontré moyennant le respect des exigences suivantes :

- Le matériau constitutif de la membrane doit être chimiquement stable vis-à-vis de l'environnement ;
- Une épaisseur minimale du produit doit être respectée de manière à pouvoir supporter les sollicitations de mise en œuvre et à offrir une résistance quasi inchangée en cas d'exposition aux intempéries pendant un certain temps (exemple : temps de remplissage de la décharge).
Cette épaisseur minimale est de l'ordre de 2 mm pour les membranes en P.E.H.D., par exemple.
- Les contraintes engendrées pendant la phase de mise en œuvre ne peuvent détériorer la membrane. Le dimensionnement doit de plus être réalisé de façon à éviter la reprise d'effort par la géomembrane. Ceci implique le choix de matériaux permettant d'assurer des coefficients de frottement au-dessus de la géomembrane, inférieurs à ceux développés en dessous de celle-ci [2] ;
- La géomembrane doit être suffisamment ancrée en tête de talus ;
- Les soudures d'assemblage des panneaux de géomembrane doivent être étanches. Elles doivent de plus être résistantes en traction-cisaillement et au pelage. Des valeurs minimales de contraintes doivent être établies ;
- Le placement de la géomembrane sur le sol ainsi que le placement du sol ou du géotextile de protection sur la géomembrane ne doit pas créer de perforation de celle-ci ;
- Le comportement à long terme de la structure doit être pris en considération.

5. ECOULEMENTS DE LIXIVIATS AU TRAVERS DES DEFAUTS DU SYSTEME D'ETANCHEITE

La géomembrane, lors de sa mise en place, peut être affectée de défauts de deux types :

- Les trous d'aiguille résultant de la chute d'objets, de blessures lors du transport ou de défaut de fabrication (diamètre de 0,1 à 0,3 mm) ;
- Des défauts plus importants consécutifs à des soudures défectueuses résultant de tensions excessives dans la membrane au moment de la mise en œuvre (vent, trafic,...) ou phénomènes de stress-cracking pour le PEHD [5] (diamètre de 3 mm² à 1 cm²).

Dans le premier cas, le débit de fuite peut être estimé par la loi de POISEUILLE tandis que l'écoulement dans de larges trous est réglé par l'équation de BERNOULLI.

Suivant le Plan d'Assurance Qualité adopté pour le contrôle des matériaux en usine et sur le site – et notamment le contrôle non destructif des soudures – le taux d'occurrence de ces défauts est variable [6]. En cas de contrôle adéquat, on peut estimer cette fréquence à 1 trou par 300 m de soudure, ce qui correspond pour une largeur de bande de 5 m, à 6,6 trous par hectare.

Le tableau ci-après permet de se rendre compte des importances relatives des divers débits de fuite au travers d'une géomembrane seule.

Tableau 5 : débit de fuite (en litre/hectare.jour) au travers d'une géomembrane en PEHD de 1 mm d'épaisseur pour diverses hauteurs d'eau

Débit de fuite (l/J/ha)					
Mécanisme	Surface du défaut (mm ²)	Hauteur d'eau (m)			
		0,003	0,03	0,3	3
Perméation	-	0,0001	0,01	1	100
Trous d'aiguille (1 trou/1500 m ²)	0,0078	0,04	0,4	4	40
Trous (1 trou/1500 m ²)	3,1	260	820	2600	8200
Trous (1 trou/1500 m ²)	100	8400	26500	84000	265000

Une fuite au travers de la géomembrane peut donc avoir des conséquences incalculables et dramatiques pour l'environnement lorsqu'elle est posée sur une couche perméable. C'est pourquoi on a tout intérêt à concevoir des systèmes à étanchéité en cascade et à préconiser des composites argile-géomembrane. L'analyse du cas de l'étanchéité simple est particulièrement éloquente.

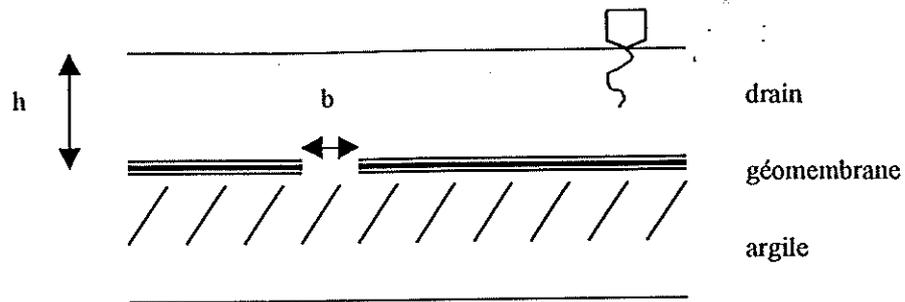


Figure 3 : étanchéité simple

Dans l'analyse qui va suivre, nous retiendrons les cas de hauteur d'eau suivants :

- 3 m : stockage de liquides industriels de produits chimiques ou de lixiviats agissant sur l'étanchéité (sur la couche supérieure d'une étanchéité double) ;
- 0,3 m : stockage de déchets solides, hauteur d'eau agissant dans le système de collecte et de drainage des lixiviats (sur la couche supérieure d'une étanchéité double) ;
- 0,03 m : hauteur d'eau ou de lixiviat agissant sur la couche inférieure d'une étanchéité double ; écoulement de l'eau dans le drain intermédiaire ;
- 0,003 m : hauteur minimum d'eau ou de lixiviat agissant sur la couche inférieure d'une étanchéité double ; écoulement de l'eau dans le drain intermédiaire ; condition que l'on rencontrera surtout sur les talus.

Un point fondamental qui va régler le développement des fuites et la percolation des lixiviats dans la couche d'argile est relatif au contact existant entre la géomembrane et la couche d'argile :

- Contact parfait (cas irréal) ;
- Excellent contact : argile bien compactée, plate, lisse, sans trace de trafic sur le chantier ; la géomembrane est flexible et sans pli ;
- Mauvais contact : le sol est mal compacté, avec une surface irrégulière et/ou fissurée ; la géomembrane est rigide et présente des plis.

Dans ce dernier cas de figure, la diffusion de l'eau à l'interface géomembrane-argile peut porter sur des distances de 30 à 50 m ; la probabilité de trouver un passage de percolation au travers de la couche d'argile est donc largement augmentée.

GIROUD et BONAPARTE [6] ont calculé les débits de fuite dans le cas de la configuration que nous avons envisagée (1 trou par 1500 m² et $k_s = 10^{-9}$ m/s).

Tableau 6 : débits de fuite au travers de diverses configurations d'étanchéité dans le cas d'une membrane d'étanchéité en PEHD de 1 mm d'épaisseur et d'une couche d'argile de 90 cm

Etanchéité	Mécanisme	Surface du défaut (mm ²)	Débit de fuite (l/J/ha)			
			Hauteur d'eau (m)			
			0,003 m	0,03 m	0,3 m	3 m
Géomembrane seule entre 2 couches perméables	Perméation	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1	100
	Trou	3,1	260	820	2600	8200
	Trou	100	8400	26500	84000	265000
Composite excellent contact	Perméation	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1	100
	Trou	3,1	0,004	0,04	0,4	4,0
	Trou	100	0,006	0,06	0,6	6
Composite contact parfait	Perméation	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1	100
	Trou	3,1	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
	Trou	100	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$

Une couche d'argile seule ne permet pas non plus de limiter les débits de fuite dans des limites raisonnables [1].

Tableau 7 : débit de fuite au travers d'une couche d'argile compactée de 90 cm d'épaisseur ($k_s = 10^{-9}$ m/s)

Hauteur d'eau (m)	Débit de fuite (l/J/ha)
3,0	3740
0,30	1152
0,03	892
0,003	866

On perçoit ici tout l'intérêt de concevoir un système d'étanchéité-drainage correct de façon à limiter les risques de fuite par l'emploi d'une étanchéité combinée argile/géomembrane et par le dimensionnement de la couche de drainage dans le but de limiter les hauteurs d'eau agissant au droit des défauts potentiels dans la membrane.

6. CONCLUSIONS

Nous ne saurions manquer ici de rappeler l'intérêt et le besoin de mettre en œuvre des Plans d'Assurance Qualité [4] relatifs aux différentes phases des travaux et englobant l'ensemble des opérations, de la conception à l'exploitation du centre d'enfouissement technique.

Le contrôle « qualité » relatif aux soudures de géomembranes constitue notamment un moyen relativement efficace de diminution des risques de fuite de lixiviats : des études récentes [8] ont montré que le suivi et le contrôle destructif et non destructif des soudures permettait de réduire l'occurrence d'un défaut à 1 fuite par 770 m de soudure.

Les systèmes d'étanchéité-drainage décrits ci-avant sont efficaces : il faut que les entrepreneurs, bureaux de contrôle ou maîtres d'œuvre soient conscients de l'importance de la qualité du travail à réaliser. Tout manquement à ces principes peut avoir des conséquences environnementales et humaines inestimables et surtout irréparables.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. RIGO J.M., MONJOIE A. et POLO-CHIAPOLINI Cl.
Vade-mecum pour la réalisation des systèmes d'étanchéité-drainage artificiels pour les sites d'enfouissement technique en Wallonie.
Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 1992.
- [2]. COURARD L. and all
Creation of a New Storage Cell in Wauthier-Braine Waste Disposal.
Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, 5-9 September 1994, vol. 3, pp. 1085-1088.
- [3]. *Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets.*
Comité Français des Géotextiles et des Géomembranes (C.F.G.G.), Fascicule n° 11, 1995.
- [4]. COURARD L.
The need of a QC/QA system in landfill projects.
Encyclopedia of Environmental Control Technology, volume 9, Geotechnical Applications, Leak Detection and Treatment Options, Paul N. CHEREMISINOFF Editor, Gulf Publishing Company, 1989, chapter 28, pp. 975-998.
- [5]. COURARD L. and RIGO J.M.
Oxidative induction time : a quality assurance measurement to predict environmental stress-cracking.
Geosynthetics : Applications, Design and Construction, EUROGEO 1, Maastricht, 30 September-2 October 1996, pp. 667-672.