

QUELQUES PROBLÉMATIQUES LIÉES À LA CONSTRUCTION DE CASIERS DE STOCKAGE DE DÉCHETS EN SURÉLÉVATION D'ISDND EXISTANTES

SOME ISSUES RELATED TO THE CONSTRUCTION OF NEW LANDFILLS OVER OLDER ONES

Francis TANO^{1,2,3}, Franck OLIVIER¹, Daniel DIAS², Nathalie TOUZE-FOLTZ³

¹ ECOGEOS, Arras, France

² LTHE, Grenoble, France

³ Irstea, Antony, France

RÉSUMÉ – Depuis 30 ans, la rareté des sites adaptés à l'implantation de nouvelles installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) conduit de nombreux opérateurs à opter pour la création de nouveaux casiers en appui sur d'anciens casiers. Cette technique d'extension d'ISDND présente en effet plusieurs avantages dont l'augmentation de la capacité de stockage tout en permettant l'utilisation des équipements existants. Toutefois, la réussite d'un projet d'extension requiert une analyse hydro-géotechnique approfondie afin de garantir la stabilité de l'installation. À la lumière de cas concrets et de l'expérience des auteurs et au vu de l'absence de réglementation spécifique encadrant ce mode de construction, cet article met en exergue quelques problématiques fortes à prendre en compte dans le cadre de nouveaux projets.

Mots-clés : extension d'ISDND, barrières de sécurité, géosynthétiques, tassements, glissement d'interface.

ABSTRACT – For about 30 years, piggy-back landfills also called landfill expansions have become an attractive option because of the scarcity of suitable sites for the establishment of new sanitary landfills. Indeed, this alternative solution consisting in building news cells over older ones offers many advantages such as the increase of waste storage capacity while using the existing operating equipment over a longer period, thus allowing savings. Beyond these benefits, a careful hydro-geotechnical analysis must be performed in order to ensure the stability of piggy-back landfills considering the related issues. Given the lack of regulations specific to this mode of construction, this paper highlights the related key issues in the light of the authors' experience and some twenty real cases worldwide.

Keywords: piggy-back landfills, liner system, geosynthetics, settlements, veneer instability.

1. Introduction

Au cours des 30 dernières années, la technique dite du « piggy-backing » qui consiste à créer de nouveaux casiers de stockage de déchets en appui sur des casiers existants, s'est fortement développée à travers le monde. En effet, les concepteurs et les exploitants des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) optent de plus en plus pour ce mode de stockage, qui offre l'opportunité d'optimiser la capacité et la durée de vie des infrastructures existantes. Toutefois, la réussite d'un projet d'extension d'ISDND requiert une analyse hydro-géotechnique approfondie afin de garantir la stabilité de l'installation et le maintien de l'intégrité des barrières de sécurité active et passive (BSA et BSP respectivement) situées à l'interface entre les anciens et les nouveaux déchets.

En l'absence de réglementation spécifique encadrant la conception et la construction de ces installations, une majorité de projets sont toutefois actuellement conçus sans prise en compte de certaines composantes techniques essentielles. Quand elles ne sont pas totalement dépourvues de géosynthétiques (GSY) de renforcement, les barrières de fond sont parfois équipées de produits inadapés ou mal dimensionnés, pouvant entraîner l'apparition de déformations excessives sous l'effet des tassements des anciens déchets (au comportement complexe et encore peu étudié). Aussi, au-delà de la question de la stabilité globale des casiers de déchets en surélévation, leur conception requiert parallèlement une analyse de stabilité au glissement le long de chaque interface géosynthétique (en fond et le long des flancs de casier). Cette analyse est là encore rarement effectuée alors qu'elle peut influencer la géométrie et la structure des casiers. Enfin, s'agissant notamment de casiers gérés en mode bioréacteur, les risques de formation d'horizons saturés en lixiviats dans les déchets sont là encore très rarement pris en compte dans les calculs de conception alors que des surpressions liquides

et/ou gazeuses non contrôlées sont susceptibles d'entraîner des fuites de lixiviats et dans certains cas de fragiliser la stabilité du futur massif de déchets.

Compte tenu de la situation décrite, les auteurs souhaitent mettre en lumière quelques problématiques fortes relatives aux extensions d'ISDND. L'objectif de cet article est d'attirer l'attention des pouvoirs publics et des exploitants d'ISDND sur la nécessité de développer des procédures et des standards techniques à la hauteur des enjeux environnementaux soulevés.

2. Principaux types d'extension d'ISDND et cadre réglementaire

2.1. Principales configurations géométriques des extensions d'ISDND

Bien qu'il soit possible de rencontrer des cas particuliers, les extensions d'ISDND peuvent être classées schématiquement selon trois configurations géométriques :

- Extension verticale (V) : dans cette première configuration, le nouveau casier est construit au sommet de l'ancien. Le volume de stockage disponible est ainsi augmenté verticalement sans débord latéral important (Figure 1a).
- Extension latérale (L) : lorsqu'il est possible d'augmenter l'emprise au sol de l'ISDND, elle peut être étendue latéralement par la construction d'un nouveau casier en appui sur les flancs de l'ancien casier (Figure 1b).
- Extension mixte (M) : c'est la configuration géométrique la plus rencontrée car elle permet un volume de stockage plus important dans la mesure où les volumes disponibles au-dessus et sur les côtés de l'ancien casier sont simultanément utilisés. Elle résulte de la combinaison des deux configurations précédentes (Figure 1c).

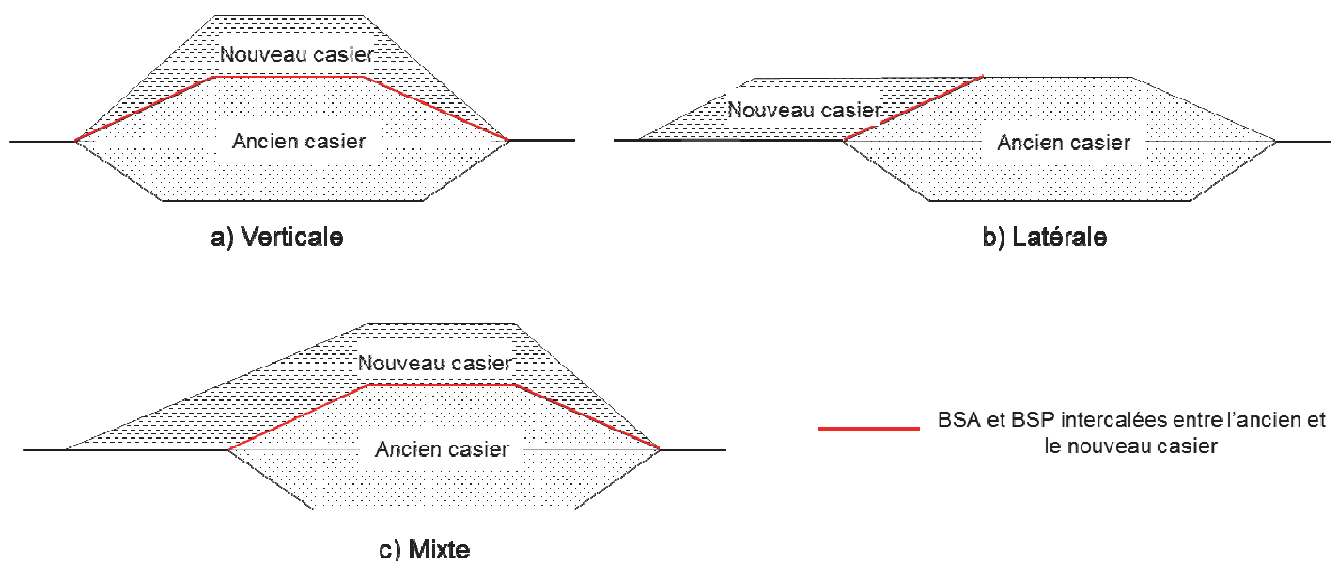


Figure 1. Principales configurations géométriques des extensions d'ISDND.

Outre la classification précédente, les extensions verticales d'ISDND présentent une large gamme de configurations (Olivier et Tano, 2013) eu égard notamment à la géométrie du casier en place et de l'extension (vallon, tumulus, etc.), aux caractéristiques des anciens déchets surchargés (hauteur, nature, âge, etc.), au type de barrière existant dans l'ancien casier et à la présence éventuelle d'ouvrages de soutènement / renforcement associées à la rehausse (consolidation de sol, digue de soutènement, etc.).

2.2. Cadre réglementaire

Afin de limiter les risques de pollution des nappes phréatiques et de préserver l'environnement souterrain, les ISDND actuelles sont soumises à un ensemble de réglementations fixant un minimum de dispositions à respecter. Elles concernent entre autre les BSA et BSP nécessaires pour le drainage des lixiviats et l'étanchéité en fond et sur les flancs des casiers.

En France, les ISDND sont soumises à l'arrêté ministériel du 09/09/1997 relatif aux ISDND, qui prescrit les dispositions générales requises en ISDND. Depuis sa publication, le texte de cet arrêté a été

modifié à plusieurs reprises par le biais de plusieurs arrêtés complémentaires (2001, 2006, 2007, 2011 et 2012), afin notamment de mieux préciser les caractéristiques requises et conditions d'exécution des BSA/BSP. Au niveau européen, on peut rappeler la Directive du Conseil de l'Union Européenne n° 1999/31/CE du 26 /04/1999 modifiée, que complètent les arrêtés français.

Cependant, il n'existe actuellement aucun texte réglementaire ou guide spécifique qui encadre la conception et la construction des projets d'extension et plus spécifiquement des BSA/BSP mises en œuvre dans le cadre de tels projets. Ni les arrêtés ministériels français, ni les recommandations du comité français des géosynthétiques (CFG) ne traitent de la conception des extensions d'ISDND. Hors de nos frontières, la situation n'est pas meilleure : ni le sous-titre D (1991) de la loi sur la conservation et la réhabilitation des ressources (RCRA) relatif aux déchets non dangereux et déchets solides des États Unis d'Amérique (USA) ou encore le guide de gestion et bonnes pratiques environnementales (BPEM) en Australie ne traitent de cette question, malgré la réalisation de projets de ce type.

Il apparaît donc important de se pencher sur les pratiques et les conceptions courantes afin d'identifier leurs limites et de proposer quelques alternatives à ces insuffisances.

3. Principaux enjeux techniques associés à la construction d'une extension d'ISDND

Les extensions d'ISDND constituent des ouvrages techniques au sein desquels interagissent des matériaux naturels (argile, sable), des matériaux artificiels (GSY) et des déchets dont le comportement peut être variable à la fois dans le temps et dans l'espace. Leur conception nécessite la prise en compte de plusieurs composantes techniques indispensables pour leur stabilité.

Un passage en revue de 22 projets dans 6 pays différents, dont la France, fait ressortir des différences majeures et des insuffisances dans la conception des BSA et BSP des casiers des extensions (Tableau 1).

Cette situation est vraisemblablement liée au manque de spécifications techniques relatives aux extensions d'ISDND (§ 2.2). Face à ces constats, il nous semble important de présenter les principales considérations techniques à prendre en compte dans le cadre de la conception d'une extension d'ISDND. L'ensemble de ces points est schématisé sur la Figure 2.

3.1. Stabilité générale

Elle concerne les glissements rotationnels (sous forme de loupes circulaires ou parfois logarithmiques) qui peuvent survenir au niveau du massif de déchets s'il présente des caractéristiques mécaniques insuffisantes. Ces loupes de glissement peuvent être superficielles et déboucher au niveau des talus extérieurs (Figure 2a) ou plus profonds pouvant même affecter le sol de fondation comme schématisé sur la Figure 2b. Outre les caractéristiques mécaniques des déchets, la stabilité générale de l'ouvrage est contrôlée par la hauteur ainsi que la pente extérieure des talus.

Par ailleurs, il n'est pas rare de rencontrer des bermes de soutènement au pied des casiers rehaussés ; cela permet non seulement de renforcer la stabilité générale de l'ouvrage mais aussi d'accroître la capacité de stockage en déchets.

3.2. Stabilité au glissement plan

Les BSA et BSP de nouveaux casiers en surélévation sont constituées d'un assemblage de plusieurs couches constituées de GSY et de matériaux naturels. Ainsi, les interfaces au niveau des BSA/BSP peuvent impliquer soit deux GSY (géotextile - géomembrane, géomembrane - géosynthétique bentonitique, etc.) soit un GSY et un matériau minéral et des déchets. Toutes ces interfaces constituent autant de plans de glissement potentiels (Figure 2c) susceptibles d'engendrer une instabilité de l'installation.

Généralement, les géomembranes (GMB) lisses constituent l'interface la moins résistante. L'angle de frottement de l'interface entre une GMB lisse et un géotextile (GTX) se situe typiquement entre 8 et 14 degrés, ce qui limite fortement la résistance au glissement plan. Ceci explique d'ailleurs pourquoi les glissements plans constituent l'une des toutes premières causes d'instabilité en ISDND (Koerner et Soong, 2000 ; Bergado et al., 2006). Il est donc essentiel d'être en mesure de développer une conception appropriée et d'opter le cas échéant (hors GMB lisse) des produits présentant un frottement d'interface suffisamment élevé afin d'éviter de tels glissements d'interface.

Comme évoqué précédemment, l'installation d'une berme de soutènement en pied de talus peut contribuer en outre à apporter une résistance supplémentaire pour la stabilité.

Tableau 1. Caractéristiques principales des différents projets d'extension d'ISDND étudiés.

Pays	Année, site	Type	GGR	PEHD ¹	Text ²	DDG ³	DDL ⁴	Références
France	2011, Site A	L						C.A.M (2011)
	2011, Site B	M	x	x				Ecogeos (2011) inédit
	2012, Site C	V	x	x				Ecogeos (2012) inédit
	2013, Site D	M		x	x			Inédit
	2013, Site E	M	x	x		x		Ecogeos (2011) inédit
	2014, Site F	M	x	x				BRGM (2009) ; Ecogeos (2010) inédit
USA	1987, Blydenburgh	V	x	x	x ⁷			Tieman et al. (1990) Barbagallo et Druback (1997)
	1990, Frederick County	V	?	x	?	?	?	Law et al. (2013)
	1991, South Alleghenies	M	x	x				Dayal et al. (1991)
	1995, Peabody	M		x ⁵	x		x	Stulgis et al. (1996)
	1996, Colonie	M	x	x				Barbagallo et Druback (1997)
	1999, Johnston County	M		x ⁵	x			Pieter (2010)
	2001, Maine	L	x	x	x ⁷		x	Grillo et al. (2001)
	2004, Nobles County	M		x		x		Lynott (2004)
	2012, South Hadley	V		x				Wehler (2011) ; Sochovka et al. (2012)
	2013, Kekaha	M	x	x				AECOM (2013)
Canada	2003, RIEDSBM	M	x	x	x			Bouthot et al. (2003) ; Blond et al. (2005)
	2010, Regina	M		x				Mihial et Wright (2011)
U.K.	2005, Danes Moss	V?	x	x	x			http://www.trisoplast.fr/downloads/2005_Danes_Moss_EN.pdf
Chine	2009, Qizishan	M	x	⁶		x		Chen et al. (2009) ; Chen et al. (2011)
	2011, SENT	M		x		x	x	http://www.epd.gov.hk/eia/regist er/report/eiareport/eia_1432007/html/Section3.htm
Australie	2015, MLRMC	M	x	⁶	x ⁷	x		G.A (2011) ; AECOM (2012)

¹Géomembrane en polyéthylène haute densité (PEHD)

²Géomembrane texturée

³Dispositif de drainage des gaz

⁴Dispositif de drainage des lixiviats sous l'extension

⁵Géomembrane en polyéthylène basse densité linéaire (PEBDL) mise en œuvre sur certaines zones

⁶Géomembrane en polyéthylène basse densité linéaire (PEBDL) mise en œuvre sur l'intégralité des surfaces

⁷Géomembrane lisse mise en œuvre sur certaines zones

3.3 Tassements

C'est l'un des aspects les plus importants à prendre en compte lors de la conception des extensions d'ISDND. En effet, la surcharge apportée par les casiers en rehausse va inévitablement engendrer une distorsion et un réarrangement des déchets sous-jacents. Cette consolidation générale est progressivement accentuée par la décomposition de la matière organique et le tamisage des particules dégradées au travers des macropores du déchet. Par conséquent, il faut s'attendre à une reprise de la cinétique des mouvements verticaux (Figure 2e) sur toute la surface des casiers. Ces tassements structurels sont en particulier susceptibles de modifier les pentes des fonds de casiers et changer ainsi le sens d'écoulement / drainage des lixiviats (Olivier et Tano, 2013). Or, malgré l'existence de méthodes rationnelles éprouvées tel que le modèle ISPM (Incremental Settlement Prediction Model) développé en partenariat avec l'ADEME (Olivier, 2003 ; ADEME, 2005), bon nombre de projets sont encore menés sans prise en compte rigoureuse de ces tassements.

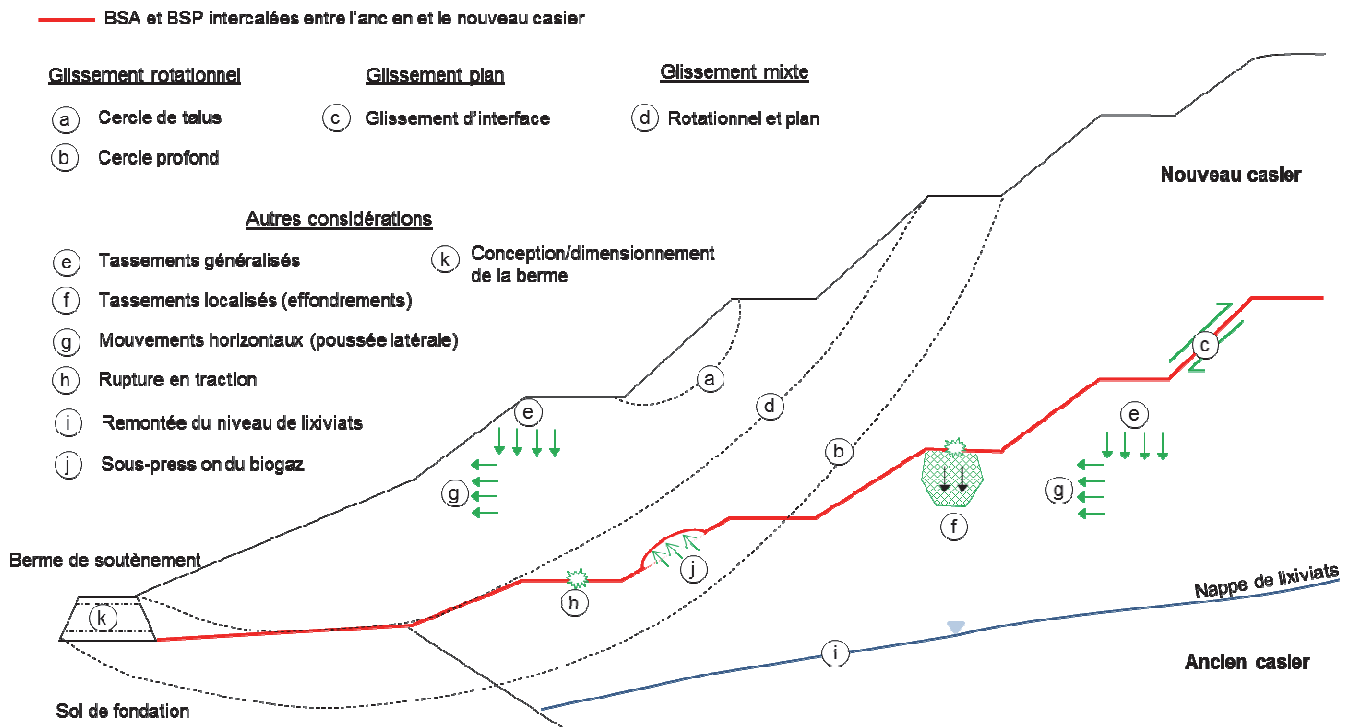


Figure 2. Principales problématiques à considérer lors de la conception d'une extension d'ISDND.

Par ailleurs, compte tenu de l'hétérogénéité des déchets, des points durs résultant de la présence de gros éléments (matelas, ferrailles, etc.) ou/et des poches molles liées à la présence de déchets fortement dégradables peuvent se former par endroits (Figure 2f). Dans le cas des sites gérés en mode bioréacteur (avec réinjection des lixiviats), ces phénomènes peuvent être accrus en cas de répartition non homogène de l'humidité au sein des déchets (Olivier et Tano, 2013).

Afin d'éviter une déformation excessive au sein des différentes couches constitutives de la BSA/BSP, il est donc indispensable de prévoir un élément de renforcement structural dont le rôle principal est de réduire les tassements différentiels. À cet effet, un GSY de renforcement est souvent mis en œuvre sous les BSA et BSP. Ce point est discuté plus en détails dans la section 4.1.

3.4 Rupture par traction

Lorsque les efforts de traction développés au sein d'un matériau (GSY ou sol) excèdent sa résistance à la traction, on observe une rupture (Figure 2h) de ce dernier, qui perd ainsi toute intégrité et fonctionnalité. La rupture par traction peut résulter des situations suivantes :

- Lors des tassements, les mouvements (descendants) des déchets le long des talus engendrent une certaine tension dans la BSA/BSP. La tension induite par ces mouvements doit rester à tout moment inférieure à la résistance ultime des matériaux constituant les barrières.
- Par effet mécanique, le poids de la colonne de déchets au-dessus des BSA et BSP induit une force tangentielle, fonction de la pente du talus. Ainsi, une pente trop raide associée à une hauteur de déchets importante est susceptible d'induire une rupture par traction. Dans le cas où des GMB texturées sont mises en œuvre, il est très probable qu'elles reprennent des efforts tangentiels importants. S'il est fait usage de telles GMB, il convient de s'assurer que la tension et les déformations induites restent dans des limites acceptables.
- Comme évoqué précédemment, les tassements différentiels peuvent entraîner des déformations considérables au niveau des couches constituant la BSA/BSP, engendrant ainsi un excès de tension dans ces couches pouvant aboutir à leur rupture.
- Enfin, des efforts de traction supplémentaires peuvent être générés durant la mise en place et le compactage des déchets ou encore suite à d'importants écarts thermiques au voisinage de la BSA/BSP.

3.5. Surpressions induites par les lixiviats

Bien que très important pour une évaluation correcte de la stabilité générale, le risque de présence de zones d'accumulation de lixiviats au sein des massifs des déchets est trop souvent sous-estimé.

Dans le cas des casiers en rehausse, le rechargement est susceptible d'engendrer une surélévation du niveau initial des lixiviats (Figure 2i) dans les anciens casiers par suite de la diminution de la taille des pores du déchet : c'est ce que l'on appelle parfois « l'effet éponge ». Si ces derniers ne disposent pas d'un DDL performant, il est possible que le niveau de lixiviats atteigne la BSA/BSP avec la formation de surpressions interstitielles susceptibles de fragiliser la stabilité des ouvrages par une réduction progressive des contraintes effectives au sein des matériaux en place. Ainsi, la stabilité générale et la stabilité au glissement d'interface peuvent être simultanément impactées par cette remontée de lixiviats.

Afin de drainer convenablement les lixiviats, il convient de mettre en œuvre un DDL adéquat et compatible avec la configuration en rehausse. Dans le cas où l'ancien casier dispose de puits verticaux, il est possible de les rehausser au fur et à mesure de l'avancée du remblaiement du nouveau casier. Cependant, leur intégrité structurelle vis-à-vis des mouvements horizontaux (Figure 2g) doit être soigneusement vérifiée. L'autre solution, pour le drainage des lixiviats, est l'installation de drains horizontaux sous la BSA/BSP afin de capter le flux ascendant de lixiviats provenant des anciens casiers. Cette solution est souvent appropriée car l'impact des mouvements horizontaux des déchets y est négligeable. Dans tous les cas, chaque site étant spécifique, le DDL devra être adapté en fonction des contraintes du projet.

Par ailleurs, il convient d'insister sur le cas des ISDND gérées en mode bioréacteur. En effet, compte tenu des exigences de la réglementation actuelle à travers l'Article 266 nonies du code des douanes pour les déchets « stockés et traités selon la méthode d'exploitation du bioréacteur : dans un casier équipé dès sa construction des équipements de captage du biogaz et de réinjection des lixiviats, la durée d'utilisation du casier étant inférieure à 18 mois et l'installation étant équipée d'un dispositif de valorisation du biogaz », on peut aboutir dans certains cas à un empilement non plus de 2 mais de 3, 4 voire 5 casiers en surélévation, notamment dans des configurations géométriques vallonnées où l'emprise au sol est très réduite (Figure 3).

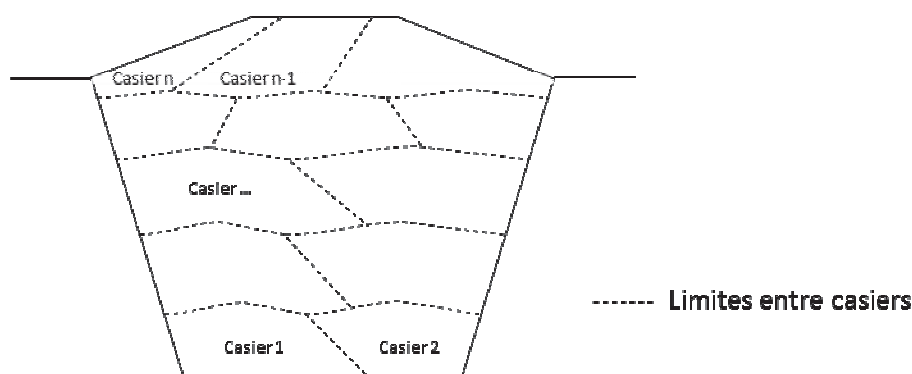


Figure 3. Exemple d'empilement de casiers dans une configuration vallonnée.

Bien que des GMB soient mises en œuvre pour assurer l'indépendance hydraulique entre chaque casier, en l'absence de géosynthétique de renforcement à chaque interface entre casiers, les risques de rupture de GMB par excès de déformation et/ou traction sont très élevés dans cette configuration. De plus, en cas de formation de surpressions liquides, les risques d'instabilité sont accentués compte tenu du nombre d'interfaces superposées.

3.6 Surpressions induites par le biogaz

La dégradation progressive des déchets s'accompagne d'une production de biogaz. Dans le cas d'une extension d'ISDND, le flux ascendant de biogaz dans un ancien casier peut exercer une surpression sous la BSA/BSP du nouveau casier si aucun DDG n'a été mis en œuvre. Cette surpression qui s'oppose mécaniquement, comme la pression interstitielle, aux contraintes de confinement de la BSA/BSP est susceptible de réduire de manière plus ou moins importante la résistance au glissement d'interface (Thiel, 1998). Ainsi, afin de limiter les risques liés à cette surpression de gaz, il est nécessaire qu'un DDG correctement dimensionné soit installé sous la BSA/BSP. De la même manière que pour le

DDL, le DDG pourra être installé horizontalement ou verticalement si l'intégrité structurelle des puits peut être garantie vis-à-vis des mouvements horizontaux des déchets.

4. Quels géosynthétiques choisir pour les BSA et BSP de l'extension ?

La mise en place d'une BSA/BSP a pour but d'une part d'éviter la percolation des lixiviats vers les horizons inférieurs et d'autre part de drainer les lixiviats retenus vers l'extérieur des casiers pour être traités. Pour qu'elles puissent jouer leurs rôles, les différentes couches de GSY rentrant dans la structure de la BSA/BSP doivent être convenablement choisies en fonction des conditions du site. Quelques critères de sélection sont présentés ci-après à l'attention des concepteurs de projets d'extension d'ISDND.

4.1. Choix du géosynthétique de renforcement

Les GSY de renforcement fabriqués à partir de polymères courants (PET, PP, PE, PVA, AR, ...), peuvent être classés en 2 grandes familles selon leur structure. On note :

- d'une part, les géotextiles (GTX) plans perméables et à base de polymères en contact avec le sol ou d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil ;
- d'autre part, les géogrilles (GGR), structures planes à base de polymère, constituées par un réseau ouvert et réguliers d'éléments résistant à la traction dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celle des constituants.

Dans le contexte des extensions d'ISDND, les GGR à très haut module de déformation apparaissent comme les mieux adaptés. En effet, la structure ajourée du produit permet un contact sol support-sol de la couche supérieure et l'imbrication des grains dans le plan horizontal, assurant ainsi une bonne stabilité d'interface. En outre, le module élevé confère à la GGR les qualités requises pour une application en renforcement notamment au droit de zones sujettes à des risques d'effondrement localisé (Figure 2f).

Le critère de dimensionnement est la raideur résiduelle de la GGR, pour la durée de service des ouvrages (fluage des polymères) et les conditions d'endommagement et de vieillissement des ouvrages. En particulier, la GGR doit être capable de reprendre convenablement les efforts de traction engendrés par les tassements différentiels et les éventuels effondrements. On retiendra donc d'un point de vue qualitatif les exigences suivantes :

- Très grande raideur résiduelle : comme évoqué précédemment, afin de maintenir un niveau de déformation acceptable, la GGR doit présenter un module de déformation élevé qui limite sa déformation à une valeur inférieure à la limite imposée pour le projet (généralement la déformation ultime de la GMB en PEHD est inférieure ou égale à 6 % pour la durée de service de l'ouvrage et une température pouvant atteindre 50°C voire au-delà). Ces exigences limitent fortement l'utilisation de GGR en polypropylène (PP) ou encore en polyéthylène (PE), ces dernières étant proportionnellement plus sensibles au phénomène de fluage et à la température (Kongkitkul and Tatsuoka, 2006 ; Kongkitkul et al., 2012).
- Résistance chimique : le pH de lixiviats jeunes est généralement légèrement acide ou proche de la neutralité (\approx pH compris entre 5,5 et 8). Toutefois, à long terme, les lixiviats ont tendance à devenir basiques avec des valeurs de pH potentiellement proche de 9. Le polymère retenu doit donc être compatible avec ces conditions chimiques. Cette exigence limite l'utilisation de produits en polyester ou encore en aramide, ces derniers étant soumis à des phénomènes d'hydrolyse pour des pH > 9.
- Facilité de pose et maintien de l'intégrité structurelle : pour jouer convenablement son rôle dans le temps, il est impératif que la GGR soit posée dans de bonnes conditions notamment au niveau des puits et autres points singuliers et à proximité des talus. Le produit doit donc présenter un faible endommagement à l'installation, présenter une bonne résistance aux UV pour permettre son recouvrement dans un délai raisonnable (2 à 3 mois) et enfin une grande flexibilité.

Enfin, pour pouvoir garantir la durabilité de la GGR, il est préférable que celle-ci dispose d'un avis technique certifiant les différents coefficients réducteurs et d'extrapolation en conformité avec le guide ISO TR 20432 (2007). En effet, outre la garantie apportée sur le produit, ces avis techniques permettent de prendre en compte des coefficients réducteurs issus d'essais de laboratoire de longue durée proposés à titre d'exemple par le British Board of Agrément (BBA) en lieu et place des coefficients réducteurs par défaut (plus pénalisants) fournis par les normes en vigueur (notamment la norme XP G 38-064). Chaque chantier ayant ses propres caractéristiques (nature et hauteur des déchets sous-

jacents et de la rehausse, présence ou non de BSA/BSP antérieure, ...), il convient de dimensionner la structure de renforcement pour chaque type d'ouvrage et d'opter pour un produit dont les propriétés physico-chimiques sont en accord avec les conditions du site et les exigences du maître d'ouvrage. Au stade actuel, les GGR en PVA semblent présenter les meilleures caractéristiques requises pour une utilisation en extension d'ISDND. En effet, très souples et sans mémoire de forme (donc faciles à mettre en œuvre), elles présentent une bonne inertie chimique ainsi que d'excellentes caractéristiques mécaniques.

4.2. Choix de la géomembrane

Avec l'évolution de l'industrie de production des polymères, il existe actuellement sur le marché une grande variété de GMB qui diffèrent principalement par leur nature et leurs propriétés (flexibilité, frottement d'interface, etc.). Le choix d'un type de GMB doit être réalisé sur la base d'une analyse globale de ses caractéristiques mécaniques, chimiques, sa résistance à la température, son aptitude à la mise en œuvre et bien sûr son coût.

En ce qui concerne le type de polymère, les GMB PEHD sont à ce jour les plus utilisées en ISDND compte tenu de leur excellente résistance chimique vis-à-vis des lixiviats. Cependant, dans le cas d'une extension d'ISDND, l'attention est tout autant portée sur la capacité du matériau à résister à de grandes déformations ; ainsi, une GMB flexible telle qu'une GMB en PEBDL pourrait s'avérer plus adaptée dans certains cas. En effet, le PEBDL est connu pour sa bonne résistance à la déformation uniaxiale (comme le PEHD) et multiaxiale (BPEM, 2010). La déformation acceptable des GMB en PEHD est limitée généralement à 4 à 6 % alors que celle des GMB en PEBDL varie entre 8 et 12 % (Peggs, 2003). Les autres polymères plus flexibles et faciles d'installation tels que l'éthylène-propylène-diène-terpolymère (EPDM), le polychlorure de vinyle (PVC) et le PP présentent plusieurs inconvénients rendant délicate leur mise en œuvre en fond et sur les flancs de casiers en extension. À titre d'exemple, l'EPDM présente une résistance mécanique limitée (à la traction). Quant au PVC, il présente une faible inertie chimique (Lambert, 1997) et est susceptible de perdre sa flexibilité à long terme par perte de ses plastifiants. De plus, ces trois polymères (EPDM, PVC et PP) présentent une résistance à la déchirure généralement inférieure au polyéthylène.

Par ailleurs, il faut souligner que la plupart des GMB utilisées en ISDND sont des GMB lisses. Cela s'explique par leur coût inférieur mais avant cela aussi par la volonté de limiter les sollicitations mécaniques qui pourraient affaiblir les caractéristiques à long terme de la GMB. En effet, dans de mêmes conditions d'installation sur un talus, une GMB lisse va nécessairement reprendre moins d'efforts de traction qu'une GMB rugueuse (texturée) du fait du frottement d'interface plus élevé de cette dernière. Cette logique est confortée par la réglementation et les recommandations françaises qui préconisent dans les conditions habituelles d'utilisation française de limiter la fonction de la GMB à l'étanchéité tout en évitant les sollicitations mécaniques de traction (CFG, 1995; MEDDE, 2007 ; XP G38-067). La question du choix de la géomembrane reste néanmoins ouverte aux échanges, au vu des avantages comparatifs de chaque solution technique.

4.3. Choix du géotextile de protection

Pour le drainage des lixiviats en fond de casier, une couche de granulats grossier perméable est mise en place au-dessus de la structure d'étanchéité. Ces granulats plus ou moins anguleux représentent un risque d'endommagement et de perforation de la géomembrane par poinçonnement. C'est la raison pour laquelle un GTX de protection (anti-poinçonnant) est disposé entre la GMB et la couche granulaire de drainage. Dans le cas d'un support déformable comme celui d'une extension d'ISDND, ce risque de poinçonnement est encore accru du fait de la concentration de contraintes en certains points.

Ainsi, afin de limiter les risques de poinçonnements, il convient de s'assurer que le GTX de protection mis en œuvre est correctement dimensionné pour préserver l'intégrité de la GMB.

De manière générale, le GTX de protection requis est un GTX non tissé aiguilleté de fort grammage et épaisseur présentant de bonnes résistances aux différents poinçons. Avec le concept d'équivalence en drainage proposé par l'article 1er-11 de l'arrêté du 31 décembre 2001 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, une partie de la couche de drainage granulaire (0,2 m généralement) peut être remplacée par un géocomposite de drainage (GCD) qui pour pouvoir garantir le rôle de protection doit disposer d'au moins les mêmes caractéristiques anti-poinçonnantes que le géotextile de protection envisagé précédemment. Dans tous les cas, le choix d'un GTX de protection ou d'un GCD anti-

poinçonnant dépend essentiellement de la charge appliquée, de la forme des grains (anguleux, arrondis) et de la granulométrie de la couche de drainage granulaire.

Le dimensionnement du GSY de protection est souvent basé sur des approches analytiques telles que celle proposée par Narejo et al. (1996). Cependant, un test (possible notamment en laboratoire) simulant le poinçonnement de la GMB au moyen des granulats sélectionnés pour les travaux envisagés et aux contraintes réelles de terrain pourrait permettre d'obtenir des résultats plus réalistes. Ce type d'essai est décrit dans plusieurs études en particulier celles de Reddy et Saichek (1998), Budka et al. (2006), Aufrère et al. (2009) et Croissant et Touze-Foltz (2012).

5. Conclusion et perspectives

Le nombre de projets d'extension verticale d'ISDND (création de nouveaux casiers de stockage de déchets en appui sur des casiers existants) a considérablement augmenté au cours des trente dernières années à travers le monde et plus récemment en France. Le développement de ce nouveau mode de construction ouvre en effet des perspectives très intéressantes, compte tenu des avantages qu'il offre en termes d'optimisation des capacités de stockage (volume additionnel) et d'utilisation des infrastructures et équipements en place (traitement des lixiviats et du biogaz, routes d'accès, etc.). Cependant, force est de constater qu'en l'absence de réglementation et de guide technique spécifique aux extensions d'ISDND, trop de projets sont encore aujourd'hui développés sans prise en compte de certaines exigences techniques pourtant essentielles pour assurer l'absence de risques sanitaires et environnementaux. En premier lieu, une sélection et un dimensionnement adaptés des différentes couches de GSY (notamment GGR de renforcement, GMB pour l'étanchéité et GTX de protection) au niveau des barrières de sécurité active et passive (BSA/BSP) est primordial pour permettre à ses dernières d'assurer durablement leur rôle dans une configuration qui génère inévitablement une recrudescence des phénomènes de tassements par suite du rechargement des anciens déchets. Une conception adéquate permet d'anticiper ces phénomènes et de limiter les champs de contraintes et déformations dans les GSY en deçà de valeurs critiques, garantissant par là même la pérennité des barrières d'étanchéité - drainage, y compris après la fin d'exploitation des installations. Par ailleurs, des problématiques de stabilité au glissement plan le long des GSY des BSA/BSP voire de stabilité générale (à l'échelle d'un ou plusieurs casiers) peuvent se poser en fonction de la géométrie de l'extension, des caractéristiques géotechniques des déchets, sols et GSY en place. Ces risques d'instabilité peuvent aussi être favorisés par l'apparition de sous-pressions liquides et/ou gazeuses dans les anciens casiers, a fortiori en présence d'anciens casiers de stockage non correctement drainés ou de casiers modernes gérés en mode bioréacteur (avec réinjection de lixiviats). Au-delà des propositions avancées par les auteurs, les considérations précédentes appellent la nécessité de définir des standards techniques précis encadrant la conception et la construction des ISDND en extension verticale. La promotion de sites expérimentaux bénéficiant d'un accompagnement des pouvoirs publics français (de la phase de pré-conception au suivi post-exploitation) permettrait enfin de bénéficier de retours d'expérience qui restent jusqu'à aujourd'hui insuffisants.

6. Références bibliographiques

- ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2005) Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de Classe II (Déchets ménagers et assimilés), 62 pages. Téléchargement sur www.ecogeos.fr
- Aecom (2012). Proposed Muga landfill expansion - stage 5, 264 pages.
- Aecom (2013). Environmental assessment, Kekaha landfill - phase II vertical expansion, 130 pages.
- Aufrère A., Bloquet C., Budka A., Croissant D., Gallo, Girard H., Lussac F. (2009). Protection anti-poinçonnement des géomembranes en installation de stockage de déchets : une procédure d'étude. *Rencontres Géosynthétiques 2009*, pp. 329-338.
- Bergado D.T., Ramana G.V., Sia H.I., Varun (2006). Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(6), pp. 371-393
- BPEM : Best Practice Environmental Management (2010). Siting, design, operation and rehabilitation of landfills. 119 pages.
- Blond E., Quesnel P., Jetté D. (2005). On-site monitoring of the first Canadian 'Piggy-Back' landfill, *Proc. Canadian Geotechnical Conference, GeoSask*, Saskatoon, Saskatchewan 58, 31 pages.

- Bouthot M., Blond E., Fortin A., Vermeersch O.G., Quesnel, P., Davidson, S. (2003). Landfill extension using geogrids as reinforcement: discussion and case study in Quebec, Canada. *Proc. 56th Annual Canadian Geotechnical Conference*, 6 pages.
- BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (2009). ISDND de Borde-Matin, commune de Roche-la-Molière (42) Tierce expertise du dossier d'avant-projet sommaire de mise en conformité du casier B, Rapport final BRGM/RP-57588-FR, 51 pages.
- Budka A., Bloquet C., Benetton J.-P. Croissant, D., Girard, H., Khay M. (2006). Performances de différents géotextiles de protection de la géomembrane dans les installations de stockage de déchets. *Rencontres géosynthétiques 2006*, pp. 29-36.
- CAM : Communauté D'agglomération De Montpellier (2011). Casier 2, ISDND de Castries, Dossier de demande d'autorisation d'exploiter, Pièce 0, Résumé non technique, rapport n° 62959/B, 71 pages.
- CFG : Comité Français des Géosynthétiques (1995). Fascicule n°11, Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets, 53 pages.
- Chen Y.-M., Gao D., Zhu B. (2009). Controlling strain in geosynthetic liner systems used in vertically expanded landfills. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1, pp. 48-55.
- Chen Y.-M., Lin W.A., Zhu B., Zhan, L.T. (2011). Performance-based design for geosynthetic liner systems in landfills. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 42(1), pp. 66-73.
- Croissant D., Touze-Foltz N. (2012). Évaluation de la protection contre l'endommagement des géomembranes en polyéthylène haute densité. *Sciences Eaux & Territoires*, 8-2012, 4 pages.
- Dayal, U., Gardner, J.M., Chiado, E.D. (1991). Design considerations of a new liner system over an existing landfill Sardinia '91, Cagliari, Italy, 1, 11 pages.
- Directive n° 1999/31/CE du 26/04/99 concernant la mise en décharge des déchets, modifiée, 27 pages.
- GA - Golder Associates (2011). Muga Lane Ressource Management, Synmonston ACT: Muga stage 5, Preliminary concept design report, 113 pages.
- Grillo R.J., Murray J.S., Leber B. (2001). An alternative liner design for a piggyback landfill. *Geosynthetics '2001*, Portlet Oregon, USA, pp. 871-880.
- Koerner R.M., Soong T.-Y. (2000). Leachate in landfills: the stability issues. *Geotextiles and Geomembranes*, 18: pp. 293-309.
- Giroud J.P., Bonaparte J.F., Beech J.F., Gross B.A. (1990). Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 7, pp. 11-50.
- ISO/TR 20432 (2007) modifié par ISO/TR 20432/AC1 (2008). Lignes directives pour la détermination de la résistance à long terme des géosynthétiques pour le renforcement du sol, 31 pages.
- Jones D.R.V., Pine R.J. (2001). Design of inclined geosynthetic lining systems for vertical landfill expansion. pp 65-74. *Proc. Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2001*, Cagliari, Italy, Vol. III. Centro Ingegneria Sanitaria Ambientale (CISA), Cagliari, Italy.
- Kongkitkul W., Tatsuoka, F. (2006). Inelastic deformation of sand reinforced with different reinforcing materials. In *Stress-strain behavior: measurement, modeling and analysis, Geotechnical Symposium in Roma*, Hoe I, Ling et al. (eds.), Springer, pp. 848-856.
- Kongkitkul W., Tabsombut W., Jaturapitakkul C., Tatsuoka F. (2012). Effects of temperature on the rupture strength and elastic stiffness of geogrids. *Geosynthetics International*, Vol. 19, Issue 2, pp. 106-123.
- Lambert S. (1997). Les géomembranes. *Ingénieries-EAT*, 11, pp. 27-40.
- Law J.H., Goudreau M., Fawole A., Trivedi M. (2013). Maximizing Landfill Capacity By Vertical Expansion, A Case Study For An Innovative Waste Management Solution. ISWA World Congress, Vienna, Austria, 9 pages.
- Lynott B. (2004). Environmental Assessment Worksheet : Nobles County Landfill Expansion. 20 pages.
- MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (1997). Arrêté du 09 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux (JO du 2 octobre 1997).
- MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2001). Arrêté du 31 décembre 2001 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux (JO du 2 mars 2002).
- MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2006). Arrêté du 19 janvier 2006 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux (JO n° 64 du 16 mars 2006).
- MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2007). Arrêté du 18 juillet 2007 modifiant l'arrêté du 09/09/1997 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux (JO n° 226 du 29 septembre 2007).
- MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2012). Arrêté du 12 mars 2012 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux (JO n° 83 du 6 avril 2012).

- Mihial D., Wright B. (2011). Design, Construction of a new solid waste disposal cell for the city of Regina. Climate for Change 2011, Saskatoon, Canada, 59 pages.
- Narejo D., Koerner R.M., Wilson-Fahmy (1996). Puncture protection of géomembrane, Part II: Experimental, Geosynthetics International, 3(5), pp. 629-653.
- Olivier F. (2003). Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Mémoire de thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 325 p. Téléchargement sur www.ecogeos.fr
- Olivier F., Tano F. (2013). Utilisation des géosynthétiques dans la conception de projets d'extension verticale d'ISDND : enjeux, méthodes et techniques mises en oeuvre, Rencontres géosynthétiques 2013, Dijon, France, pp. 187-189. Téléchargement sur www.ecogeos.fr
- Peggs I.D. (2003). Geomembrane liner durability: Contributing factors and the status quos, 1st United Kingdom Symposium, UK. Geosynthetics: Protecting the Environment, Chapter of IGS, invited keynote speaker, 32 pages.
- Pieter K.S. (2010). Avoidance landfills: unleashing the potential, Capstone Seminar Series '2010, Greensboro, NC, 33 p.
- RCRA: Resource Conservation and Recovery Act (1991) Subtitle D, Non-Hazardous solid Waste Landfill
- Reddy K.R., Saichek R.E. (1998). Performance of protective over systems for landfill geomembrane liners under long-term msw loading. *Geosynthetics international* 1998, 5(3), pp. 287-307.
- Sochovka R., Harlacke, M., Tafuto W.S., Wehler B.M., Allen, B.S. (2012). A project of many firsts: The South Hadley landfill cell 2D vertical expansion, SWANA landfill reuse excellence award 2012, 17 pages.
- Stulgis R.P., Soydemir C., Telgener R.J., Hewitt R.D. (1996). Use of geosynthetics in 'piggyback landfills': a case study. *Geotextiles and Geomembranes*, 14, pp. 341-364.
- Thiel (1998). Design methodology for a gas pressure relief layer below a geomembrane landfill cover to improve slope stability- technical paper. *Geosynthetics international* 1998, 5(6), pp. 589-617.
- Tieman G.E., Druback G.W., Davis K.A., Weidner C.H. (1990). Stability of vertical piggyback landfill expansions. *Geotechnics of waste fills - Theory and practice, Philadelphia, ASTM STP, 1070, pp. 285-297.*
- Wehler B.M. (2011). A project of many firsts: The South Hadley landfill vertical expansion, 41 pages.
- XP G 38-064 (2010). Utilisation des géotextiles et produits apparentés - Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques, Justification du dimensionnement et éléments de conception, 68 pages.
- XP G 38-067, Géosynthétiques - Géotextiles et produits apparentés - Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente - Justification du dimensionnement et éléments de conception. 38 pages.
- http://www.trisoplast.fr/downloads/2005_Danes_Moss_EN.pdf
- http://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_1432007/html/Section3.htm

