

UTILISATION DES GÉOSYNTHÉTIQUES DANS LA CONCEPTION DE PROJETS D'EXTENSION VERTICALE D'ISDND : ENJEUX, MÉTHODES ET TECHNIQUES MISES EN ŒUVRE

USE OF GEOSYNTHETICS IN THE DESIGN OF SANITARY LANDFILL VERTICAL EXPANSIONS: ISSUE, METHODS AND IMPLEMENTED TECHNIQUES

Franck OLIVIER, Francis TANO
ECOGEOS, Arras, France

RÉSUMÉ – Face aux difficultés à identifier des sites adaptés pour l'implantation de nouvelles ISDND, la tendance actuelle consiste à privilégier les extensions verticales de sites existants. Au-delà des avantages que représente ce mode de stockage (casiers construits en surélévation sur d'anciens déchets), une prise en compte rigoureuse des phénomènes de tassements (réactivés sous l'effet du rechargement) s'avère nécessaire pour garantir le maintien à long terme des fonctions drainage et étanchéité de la barrière de sécurité active et passive (BSA/BSP). Une méthode de conception itérative inspirée du modèle incrémental ISPM a été développée. Appliquée depuis 4 ans sur plusieurs ISDND françaises, elle a permis entre autre le dimensionnement de géogrilles de renforcement sous BSA/BSP. Mots-clés : ISDND, extension verticale, tassements, barrière de sécurité, géosynthétiques.

ABSTRACT – Given the difficulties to identify suitable sites for the establishment of new sanitary landfill sites, the current trend tends to give priority to the vertical extension of existing sites. Beyond the benefits of this storage method (cells built over older waste), a careful consideration of the settlement phenomena (reactivated under the loading effect) is necessary to ensure the long-term continuity of the drainage and sealing functions of bottom liner systems. An iterative design method inspired from the ISPM incremental model has been developed. Applied for 4 years on several landfills located in France, it allowed in particular the design of reinforcement geogrids required under the bottom liner system. Keywords: sanitary landfill, vertical expansion, settlements, liner system, geosynthetics.

1. Introduction

Les Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) constituent des ouvrages de plus en plus techniques au sein desquels interagissent des matériaux naturels (argile, sable), des matériaux artificiels (géosynthétiques) et des déchets dont le comportement peut être variable à la fois dans le temps et dans l'espace. La technicité de ces installations s'est encore accrue ces dernières années avec la conception de casiers de stockage construits en surélévation d'anciens casiers fermés. Cette nouvelle conception en rehausse, parfois dénommée « *piggy-backing* » par les Anglo-Saxons, a été mise en œuvre pour la première fois en 1987 sur une installation de stockage de déchets près de New-York (Bouthot et al., 2003), avant d'être reprise et développée durant les deux dernières décennies en Amérique du Nord, en Australie et plus récemment en Europe et en France où l'on compte désormais une quinzaine de sites de ce type.

Dans le contexte actuel marqué par la difficulté à identifier des sites adaptés pour l'implantation de nouvelles ISDND, ces installations en rehausse constituent de moins en moins des cas isolés : un simple passage en revue des projets d'ouverture de sites (à travers les publications de marchés publics d'études par exemple) confirme la multiplication de projets de ce type et selon toute vraisemblance, leur nombre devrait encore s'accroître à moyen terme, indépendamment de leur mode de gestion (public ou privé). Du point de vue du foncier, ils présentent en effet l'avantage de limiter l'étendue des installations en place sur le territoire, avec pour bénéfice la préservation de terres agricoles mais aussi une relative simplification des procédures d'ouverture pour les exploitants (puisque l'acquisition de nouveaux terrains n'est pas ou peu nécessaire). Du reste, lorsqu'un exploitant d'ISDND a su tisser de bonnes relations avec les riverains du site dont il a la gestion, il va de soi qu'il aura proportionnellement plus de facilité à promouvoir une extension sur ce même site plutôt que dans un territoire / une commune où il n'est pas encore implanté.

Cependant, le stockage de nouveaux déchets en surélévation d'anciens déchets conduit à une réactivation des tassements des déchets sous-jacents susceptible d'entraîner, à défaut de la mise en œuvre de structures de renforcement adéquates, des déformations importantes au sein des barrières d'étanchéité minérales et synthétiques. De plus, dans le cas de projets d'extension établis pour partie en appui sur des talus de déchets existants, des instabilités « en grand » sont également possibles, favorisées par la présence d'interfaces géosynthétiques pouvant représenter autant de surfaces (planes) de glissement préférentielles. Dès lors, il apparaît capital d'intégrer toutes les composantes de l'analyse géotechnique, de manière à garantir non seulement la stabilité générale des installations mais aussi le maintien à long terme des performances (étanchéité, drainage) de leur Barrière de Sécurité Active/Passive (BSA/BSP) de fond. Un dimensionnement rigoureux et une installation soignée des géosynthétiques présents au niveau de la BSA/BSP de fond constituent à cet égard un facteur essentiel de réussite des projets d'extension verticale.

2. Caractéristiques des projets d'extension verticale d'ISDND et enjeux associés

Comme cela a été expliqué précédemment, la technique d'extension verticale d'ISDND consiste à créer un ou plusieurs nouveaux casiers de stockage (pour partie ou entièrement) en appui sur des casiers de déchets fermés plus anciens. Au-delà de cette première définition, les extensions verticales d'ISDND englobent une large gamme de configurations, eu égard notamment :

- *à la géométrie du casier en place et de l'extension (Figure 1) :*
 - Rehausse en fond de vallon ou carrière avec appui sur les flancs en déblai
 - Rehausse en tumulus avec appui intégral sur les anciens déchets
 - Rehausse à flanc de talus avec appui (partiel ou intégral) sur un ancien casier
- *aux caractéristiques des anciens déchets surchargés :*
 - Nature des déchets (déchets ménagers, industriels, encombrants, déchets verts, etc.)
 - Hauteur des déchets (5 à 50 m en général)
 - Âge des déchets (0 à plus de 30 ans)
 - Degré d'humidité des déchets
- *au type d'équipement de sécurité des anciens casiers :*
 - Pas de BSA/BSP (anciennes décharges)
 - BSA/BSP existante mais ne répondant pas strictement à l'arrêté du 09/09/1997 modifié le 19/01/2006 (en particulier en termes d'équivalence hydraulique)
 - BSA/BSP répondant en tous points à la réglementation actuelle
- *à la présence éventuelle d'ouvrages de soutènement / renforcement associées à la rehausse*
 - Réseau de consolidation / renforcement de sous-sol (PVD, injections, colonnes ballastées)
 - Mur renforcé (terre armé, gabions, etc.)
 - Mur poids en remblai

De par la combinaison possible des facteurs précédents, les projets d'extension verticale présentent en définitive des caractéristiques très diverses, ce qui fait de chaque projet un cas unique. Dans ces conditions, il n'est pas possible d'apporter de solution de dimensionnement standard, tout au plus peut-on proposer une démarche générale d'analyse. Par ailleurs, la diversité des configurations rencontrées doit amener le gestionnaire du site à faire réaliser avant toute chose un audit du casier et du sol d'assise concerné par la rehausse, notamment si des incertitudes techniques demeurent (sol compressible, déchets humides pouvant conduire à la formation de nappes perchées, etc.). En effet, certaines situations peuvent appeler des dispositions particulières (consolidation de sol, drainage des lixiviats, etc.).

Enfin, une attention toute particulière doit être portée à la conception de la BSA/BSP de la future extension. Étant donné la configuration en rehausse d'un premier casier de déchets, la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre de la BSA/BSP revêtent en effet une importance cruciale. Une étude d'équivalence hydraulique doit entre-autres être menée (conformément aux prescriptions de la version 2 du « Guide Équivalence » édité par le MEEDDAT en 2009) afin de vérifier que la configuration proposée pour la BSP garantit un niveau de protection équivalent à celui que procure la configuration de base prévue par la réglementation en vigueur (1 m d'argile à $k < 10^{-9}$ m/s + 5 m de couche d'atténuation à $k < 10^{-6}$ m/s, k étant la conductivité hydraulique au sens de Darcy). La structure type de la BSA/BSP est rappelée dans le tableau 1.

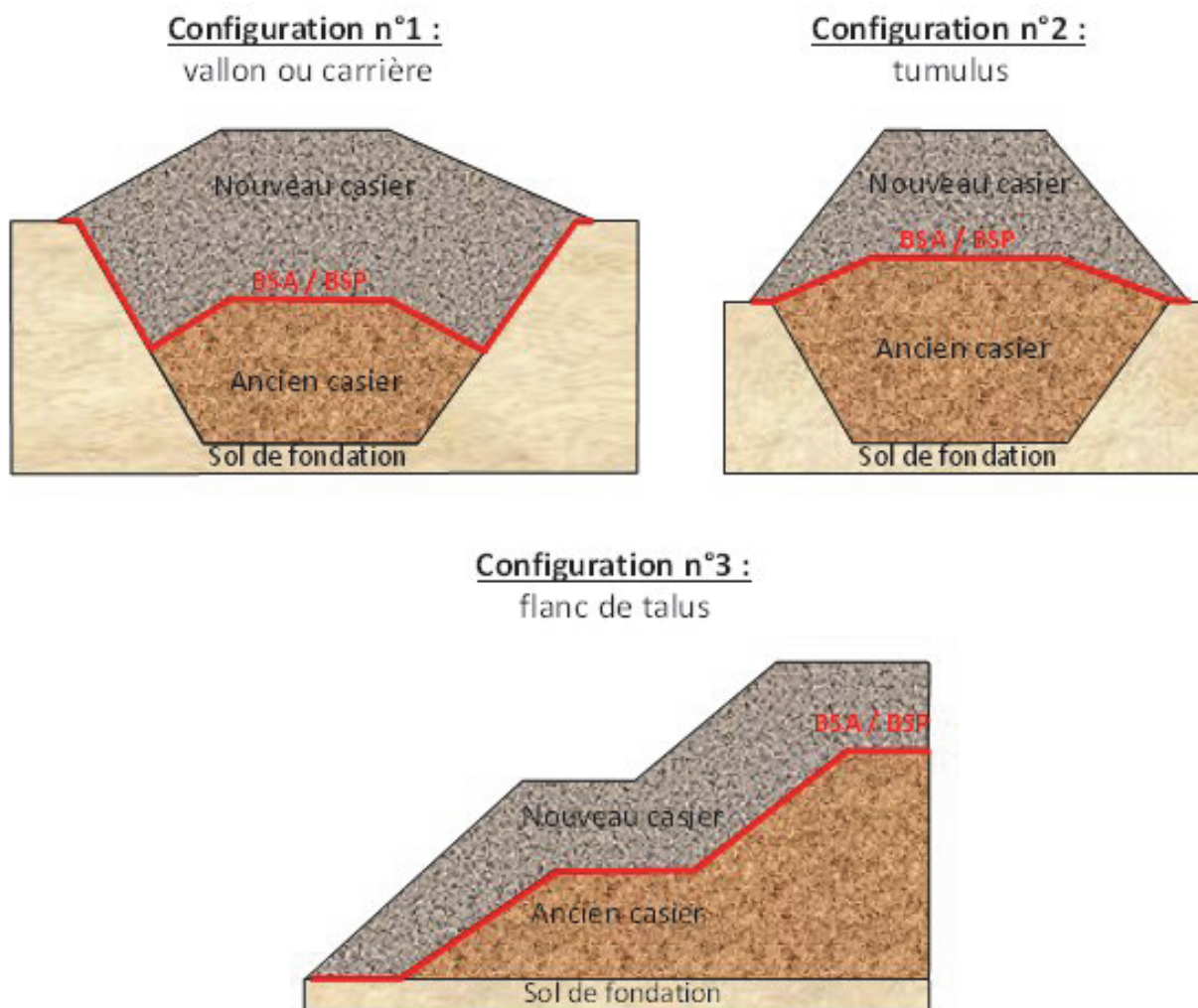


Figure 1. Configurations de rehausse pouvant être rencontrées (éventuellement de manière combinée).

Tableau 1. Constitution des barrières de sécurité sur des déchets existants

| Barrière de sécurité | Fond de casier | | Flancs de casier | |
|----------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|--|
| | Fonction | Matériau | Fonction | Matériau |
| BSA | Drainage | Matériaux granulaires (+ géodrains : optionnel) | Drainage | Géosynthétique ¹ |
| | Étanchéité active | Géomembrane ¹ | Étanchéité active | Géomembrane ¹ |
| BSP | Étanchéité passive | Argile seule (épaisseur : 1 m) ou argile associée à un GSB ² ou un sol traité (SBP ³ par exemple) | Étanchéité passive | GSB ² ou sol traité et 0,5 m d'argile sur les 2 m inférieurs à partir du fond du casier |
| | Renforcement mécanique | Géogrille ⁴ | Renforcement mécanique | Géogrille ⁴ |
| | Atténuation + couche de forme | Matériaux du site ⁵ | Atténuation + couche de forme | Matériaux du site ⁵ |

¹ Géotextile de protection anti-poinçonnement à prévoir.

² GSB : GéoSynthétique Bentonitique

³ SBP : Sable-Bentonite-Polymère

⁴ Élément structurel pas encore systématiquement proposé dans le cadre de projets d'extension

⁵ Dans le cas où une partie du nouveau casier vient reposer sur le sol naturel, la couche de forme peut être localement supprimée. Un nivellement du support est en revanche toujours requis.

3. Méthode de conception et de dimensionnement d'une extension verticale

3.1. Aux fondements de la méthode : la question du tassement des déchets

3.1.1. Tassement des déchets : de quoi parle-t-on ?

La méthode proposée (Figure 2) réside en premier lieu dans la prise en compte des tassements des déchets qui sont susceptibles d'engendrer certains désordres pour le casier en surélévation suite au rechargement. Pour appréhender au mieux les déformations prévisibles dans les déchets en place (sous la BSA/BSP) mais aussi au sommet du casier en surélévation, on se doit de considérer à la fois les tassements structurels et les tassements ponctuels susceptibles d'apparaître dans le massif de déchets.

Les tassements structurels (ou encore « à grande échelle ») résultent principalement :

- d'actions mécaniques (principalement liées à l'application de surcharges qui entraînent une distorsion et un réarrangement des composants du déchet) ;
- d'actions biochimiques (sous l'effet de la décomposition de la matière organique du déchet) ;
- d'actions physico-chimiques (corrosion des matériaux ferreux, phénomènes d'oxydation, etc.) ;
- et d'un tamisage des particules dégradées au travers des macro-pores du déchet.

Ces mécanismes interagissent entre eux en se superposant de manière complexe au cours du temps. Leur association peut néanmoins être représentée à partir de deux composantes distinctes (Olivier, 2003) :

- un tassement primaire (à court terme) résultant du chargement par les déchets sus-jacents et la couverture. Cette composante de courte durée (quelques jours à quelques semaines) est généralement supposée indépendante du temps ;
- un tassement secondaire (à long terme) supposé indépendant de la charge et pouvant se poursuivre au cours de plusieurs décennies.

L'amplitude de ces tassements peut atteindre des niveaux cumulés de plusieurs mètres après 30 ans. Aussi, compte tenu des variations spatiales inévitables au regard du type, de la hauteur et de l'âge des déchets enfouis, des écarts de tassement importants (tassements différentiels) peuvent apparaître d'une zone à une autre d'un même casier de stockage. Ces tassements peuvent engendrer, dans un contexte d'extension verticale, une perte d'intégrité de la barrière intermédiaire et une rupture des fils d'eau gravitaires.

À la différence des tassements structurels, les tassements ponctuels résultent d'effondrements localisés qui peuvent parfois se produire dans un massif de déchets. En effet, bien que constitués majoritairement d'une « matrice fine » de comportement mécanique modérément variable (à âge et niveau de compression donné), les déchets ménagers et assimilés ne présentent pas moins une certaine hétérogénéité résultant de la présence de gros éléments (matelas, ferraille, etc.) pouvant agir comme des points durs au sein de la structure du matériau ou à l'opposé comme des poches plus molles en cas de dépôt de déchets fortement dégradables et/ou de consistance plastique (boues, déchets putrescibles, etc.). Dans le cas des bioréacteurs (avec réinjection des lixiviats), ces phénomènes peuvent du reste être accrus en cas de répartition non homogène de l'humidité au sein des déchets.

3.1.2. Évaluation des tassements sous l'effet d'un rechargement

Afin d'anticiper les mouvements (structurels) futurs de la barrière de rehausse de casier, il est proposé en premier lieu l'utilisation du Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements (modèle ISPM) [Olivier (2003), ADEME (2005)]. En effet, l'application de ce modèle présente, vis-à-vis des modèles traditionnels, des avantages tant fondamentaux (détermination de coefficients de compression intrinsèques au déchet) que pratiques (fiabilité accrue des prédictions). En outre, le caractère incrémental de ce modèle (analyse par couche élémentaire de déchets) lui confère une grande souplesse d'utilisation, le prédestinant à l'étude de massifs de déchets de hauteur et d'âge souvent variables dans l'espace. Enfin, ce modèle présente l'avantage d'avoir été calibré sur une cinquantaine d'ISDND en France et à l'étranger, ce qui lui confère une robustesse que n'ont pas d'autres modèles.

Par ailleurs, en complément de l'étude traditionnelle des tassements structurels (à grande échelle), il convient, afin d'anticiper (de manière conservative) les déformations maximales qui peuvent se produire au sein d'un massif de déchets, de prendre en compte parallèlement le risque de survenue d'affaissements localisés. En l'absence de modèle mathématique adapté, ce risque est estimé sur la base de retours d'expériences acquis sur un grand nombre de sites dans le monde.

3.2. Déroulement de la méthode par étape

La figure 2 résume les étapes successives de la méthode suggérée. À l'issue de la préparation de l'étude (étape n°1), des investigations complémentaires (étape n°2) peuvent s'avérer nécessaires en fonction de la qualité des données disponibles. Une fois les données jugées suffisantes, celles-ci viennent alimenter les hypothèses de travail qui doivent être fixées avant d'aborder l'étape n°3 de calcul des tassements. Sur la base du premier jeu d'hypothèses considéré, les tassements des déchets en place et en surélévation sont évalués sur la totalité de l'emprise du casier étudié, selon un maillage suffisamment resserré pour permettre l'évaluation des tassements différentiels maximum. L'échelle de temps prise en compte dans le cadre de ces calculs diffère naturellement selon qu'on considère les tassements des seuls déchets en place au niveau de la BSA/BSP ou au contraire les tassements de l'ensemble de la colonne de déchets (déchets en place + déchets en surélévation) au niveau de la couverture sommitale du nouveau casier. Mais dans tous les cas, on cherchera à se placer dans les conditions les plus défavorables pour le projet, soit généralement à l'issue de la période de post-exploitation du site (prise forfaitairement 30 ans après la pose de la couverture du casier supérieur). Une fois l'ensemble des calculs réalisés, on peut entamer l'étape n°4 qui va consister en premier lieu à vérifier le maintien des fils d'eau après tassements au niveau de la BSA (pour le drainage des lixiviats des déchets supérieurs) mais aussi au niveau de la couverture du nouveau casier (avec pour objectif cette fois d'éviter la formation de zones de stagnation d'eau de pluie).

À l'issue de ces vérifications, les hypothèses de départ, se révélant être presque systématiquement imparfaites, vont nécessiter plusieurs adaptations pour aboutir in fine à une solution technique satisfaisante. Il est donc nécessaire de revenir à l'étape précédente (n°3) autant de fois que nécessaire jusqu'à tendre (par approximations successives) vers la solution technique optimale. À chaque boucle itérative, un échange est souhaitable avec le maître d'ouvrage ou son représentant afin d'affiner les hypothèses de travail dans un sens qui reste conforme aux futures contraintes d'exploitation du site. Tel que présenté sur la figure 3, cela passe notamment par l'adaptation spatiale :

- de l'épaisseur de la couche de forme (épaisseur variable en tous points du casier),
- des pentes de la BSP/BSA $\Rightarrow \alpha(x, y)$,
- des pentes du complexe de couverture du nouveau casier $\Rightarrow \beta(x, y)$.

Compte tenu de la robustesse de la méthode de prévision des tassements (qui garantit un minimum d'incertitude sur les ordres de grandeur et la distribution des tassements post-exploitation), il est en outre possible dans le cadre de la méthode de conception proposée (Figure 3), en comparaison d'une conception traditionnelle (qui évalue les tassements de manière plus ou moins forfaitaire) :

- de réduire les pentes sommitales $\beta(x, y)$ de la couverture de l'extension ;
- et éventuellement de rehausser le niveau supérieur maximum des déchets d'une hauteur δH (Figure 3) par anticipation des tassements post-exploitation, tout en garantissant un retour sous la côte supérieure nominale fixée à une échéance donnée (à déterminer au cas par cas).

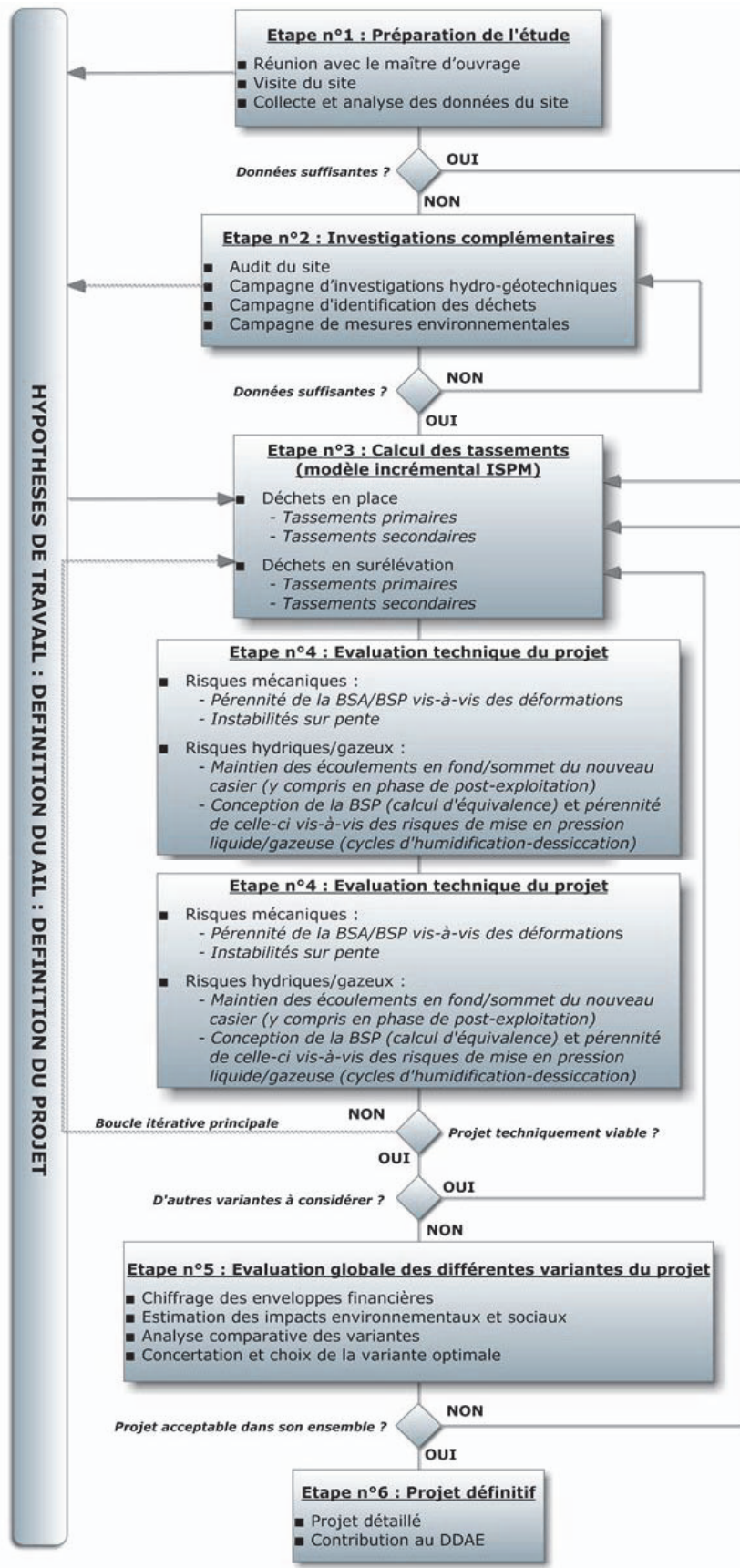


Figure 2. Méthodologie générale proposée dans le cadre de la conception d'un casier en rehausse

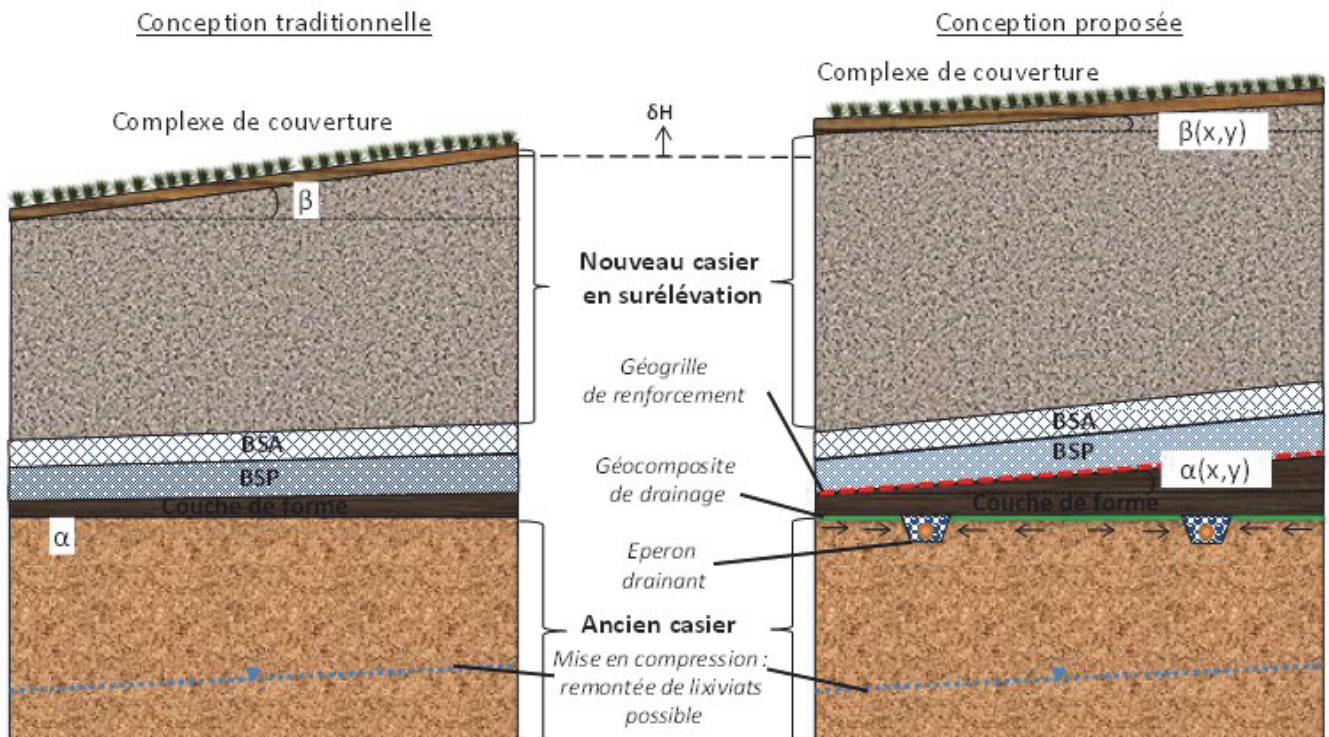


Figure 3. Comparaison des conceptions proposée et traditionnelle pour un casier en rehausse.

Outre les problématiques d'écoulements internes/externes et de rehausse verticale, d'autres questionnements techniques sont posés dans le cadre de l'étape n°4 (renforcement par géogrille, drainage des lixiviats et du biogaz, etc.). Ceux-ci sont détaillés ci-après (§ 3.3 et 3.4). Une fois le projet considéré comme viable, et ses éventuelles variantes épuisées, on peut passer enfin à l'évaluation globale du projet (étape n°5) suivie du projet détaillé (étape n°6), si ce dernier est jugé acceptable.

3.3. Conception et dimensionnement d'un géosynthétique de renforcement en vue du maintien de la fonction étanchéité de la BSA/BSP

Afin d'éviter tout risque de perte d'intégrité (par déchirure ou fissuration) de la BSA/BSP sous l'effet des tassements différentiels qui ne manqueront pas de se produire sous la barrière de sécurité du nouveau casier en rehausse, il convient de prévoir un renforcement mécanique à l'aide d'un géosynthétique de renforcement (géogrille, géonappe, etc.) à même de reprendre des efforts importants tout en se déformant le moins possible à court comme à long terme (matériau peu sensible au fluage). Ce géosynthétique devra être placé entre la couche d'étanchéité minérale et la couche d'atténuation naturelle pour jouer pleinement son rôle.

3.3.1. Méthode de dimensionnement du renforcement en présence d'une cavité

Le géosynthétique de renforcement devra pouvoir résister à la fois à l'apparition de tassements structurels importants (et fortement variables spatialement) et à la formation éventuelles de zones d'effondrement localisées. Ce deuxième phénomène est traité ici plus en détail.

Giroud et al. (1990) ont été les premiers à proposer, en présence d'une cavité sous une barrière d'étanchéité, une méthode analytique permettant de dimensionner le renforcement nécessaire, avec prise en compte de l'effet membrane induit. Cette méthode a été reprise et adaptée afin de permettre une prise en compte de la pente de la barrière suivant une méthode par approximations successives (Figure 4). Cette méthode de dimensionnement du renforcement s'applique en six étapes depuis la définition des hypothèses retenues pour le calcul jusqu'à l'évaluation des performances du géosynthétique présélectionné (Figure 5).

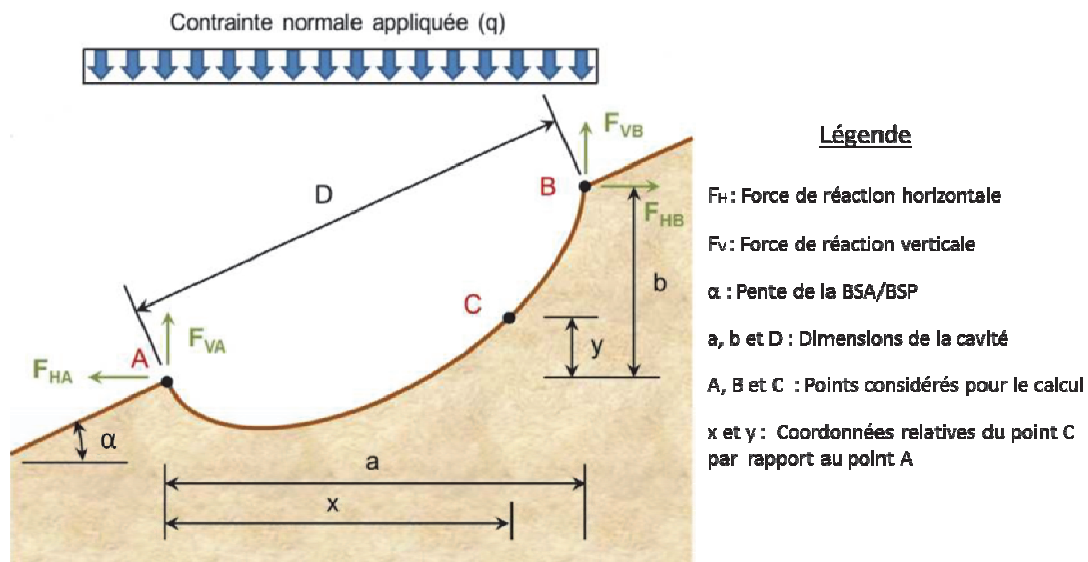


Figure 4. Illustration de la méthode de dimensionnement du renforcement sur pente.

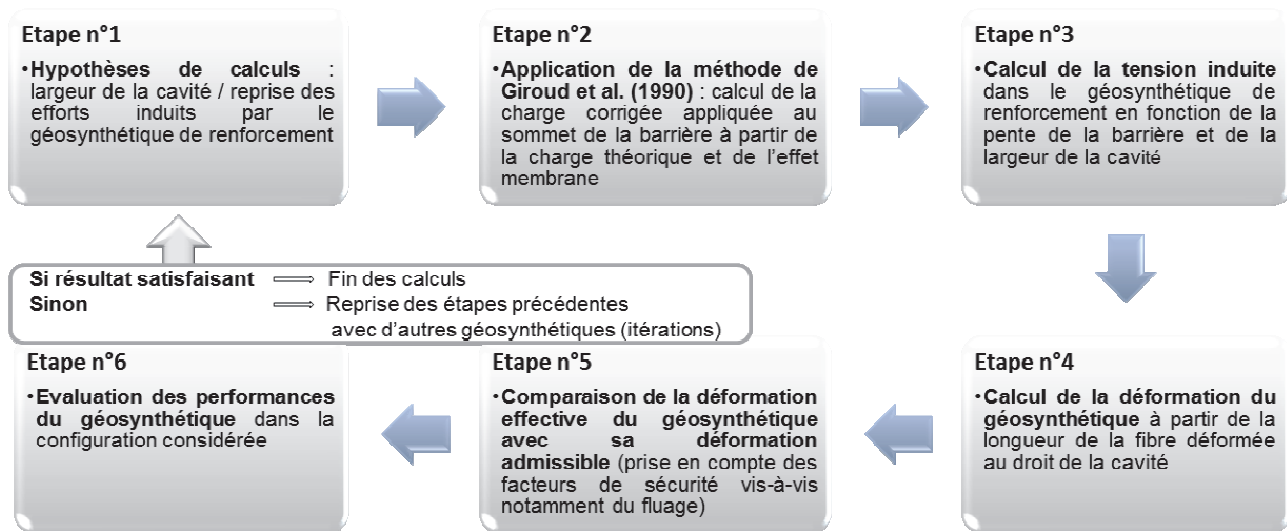


Figure 5. Étapes du processus itératif dans le cadre du dimensionnement du géosynthétique de renforcement (en présence d'une cavité).

3.3.2. Calibration du dimensionnement en fonction des situations étudiées

Dans le cadre du calcul présenté sur la Figure 5, il est nécessaire en premier lieu de fixer une déformation admissible, correspondant à la charge de traction nominale de la géomembrane et du géosynthétique de renforcement testé (valeur la plus faible à retenir). S'agissant de la charge verticale à considérer, la prise en compte de la totalité de la hauteur des déchets de la rehausse serait très peu réaliste. En effet, lorsqu'on remplit progressivement de matériaux granulaires un cylindre vertical, la pression qui s'exerce sur le fond croît de moins en moins vite et se stabilise à une valeur limite lorsque la colonne stockée atteint une certaine hauteur, à cause des frottements sur les parois : c'est ce qu'on appelle l'« effet silo ». Ce phénomène est d'autant plus présent dans le cas de déchets qu'aux frottements inter-constituants s'ajoute une « cohésion de fibres » qui a pour effet de retenir les éléments entre eux (par enchevêtrement), ce qui diminue d'autant la charge à la base de la colonne où s'est produit l'effondrement. Un calcul tenant compte de l'épaisseur de la BSA/BSP, du coefficient des terres au repos et de l'angle de frottement interne des déchets permet de déterminer cette charge q (Figure 4).

La prudence amenant en outre à se placer dans les conditions potentiellement les plus pénalisantes, il est appliqué une série de coefficients correcteurs lors du dimensionnement du géosynthétique, notamment :

- un coefficient de pondération (conforme aux principes des Eurocodes) ;

- une série de *coefficients réducteurs* relatifs aux risques d'endommagement mécanique (lors de la mise en œuvre), aux risques environnementaux (essentiellement fonctions de l'inertie chimique du géosynthétique) et aux risques de fluage (fonctions de la nature du géosynthétique, de la durée de vie considérée de l'ouvrage et de la certification éventuelle du produit envisagé).
- et enfin un *coefficient général de sécurité*.

Enfin, la valeur de déformation nominale considérée pour le produit représente généralement une valeur de déformation à 20°C. Si l'on considère une température moyenne voisine de 40 à 50°C au cœur des déchets et par ailleurs une augmentation de l'allongement ultime fonction de la température (cf. courbes isochrones des produits étudiés), il est nécessaire de réduire d'autant l'allongement nominal du produit afin de ne pas dépasser sa valeur ultime.

S'agissant de barrière passive, les valeurs de déformation limite des GSB et des sols traités sont en général suffisantes pour satisfaire les conditions du calcul précédent. Il reste le cas de la couche d'argile qui en conditions de laboratoire (non confinée) présente une résistance aux déformations souvent assez faible. Néanmoins, les travaux réalisés par Jessberger and Stone (1991), Viswanadham et Mahesh (2002) et plus récemment Camp (2008), en conditions confinées, ont largement relativisé les risques de mise en traction car lorsque la pression due à la surcharge augmente, les mécanismes de mise en traction sont progressivement remplacés par des phénomènes de cisaillement comparativement moins pénalisants (notamment en présence d'un géosynthétique de renforcement) (Figure 6).

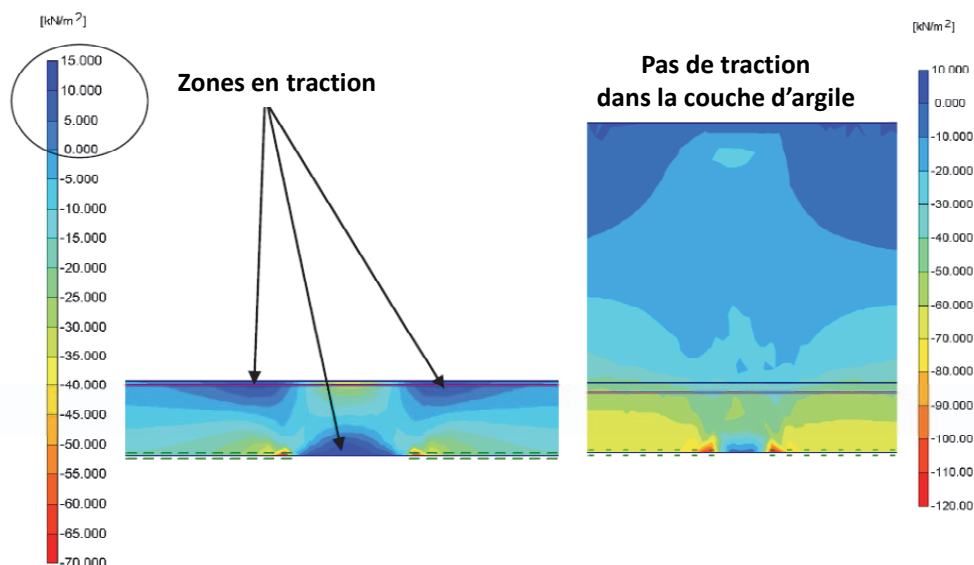


Figure 6. Modes de sollicitations dans une argile compactée (Camp, 2008) (a) développement de mécanismes de traction en l'absence de confinement (b) traction supprimée après surcharge.

3.4. Autres considérations techniques

En complément des questions abordées précédemment, d'autres problématiques sont susceptibles de se poser lors de la conception d'un casier en rehausse, comme par exemple la question de la mise en œuvre des géosynthétiques (CFG, 2011). Celles-ci ne peuvent être abordées ici dans le détail. Toutefois, à titre d'exemple, deux points bien spécifiques peuvent être brièvement soulevés :

- *Drainage des lixiviats et du biogaz issus des anciens déchets sous la BSA/BSP* : dans certains cas, la dégradation des déchets couplée aux infiltrations d'eau de pluie dans les anciens casiers est susceptible d'engendrer une forte humidification des déchets en place, que le rechargement des anciens déchets peut encore accentuer (sous l'effet de la diminution de la taille des pores du déchet). Aussi, en présence de déchets initialement très humides (avec éventuellement présence de nappes perchées) et/ou de biogaz insuffisamment drainés, notre approche préconise la mise en place d'éperons drainants éventuellement couplés avec un géocomposite de drainage (Figure 3) sous la couche de forme comme cela se fait aussi sous les dalles béton des bâtiments construits sur sols pollués (Gendrin et al., 2011) afin d'éviter tout risque de remontée de lixiviats / biogaz au contact de la couche d'étanchéité passive. En effet, les argiles et plus encore les GSB sont des matériaux sensibles aux cycles d'humidification / dessiccation et, à ce titre, doivent donc

être maintenus dans un état hydrique le plus stable possible. Selon les besoins, les équipements précédents peuvent ainsi être conçus comme des réseaux simples ou mixtes (lixiviats / biogaz).

- **Stabilité sur pente** : dans le cas de rehausses en configuration de pentes à fort gradient, il importe de considérer avec précaution les propriétés d'interface (notamment résiduelles) des matériaux synthétiques et minéraux. En effet, les angles de frottement d'interface entre les matériaux les plus couramment posés varient globalement dans une fourchette de 6 à 20°, selon l'état de surface des géosynthétiques considérés, leur humidité de surface, leur déformation, etc. (Bergado et al., 2006 ; Eid, 2011). De plus, selon l'état de surface (plus ou moins lisse ou rugueux) de chaque géosynthétique, le report des forces latérales (en cas de légère déformation du talus) peut se faire tantôt sur une interface ou sur une autre. En définitive donc, il est important avant toute mise en œuvre de BSA/BSP de conduire au préalable une étude de stabilité d'interface / de bloc (cf. notamment norme XPG38-067, 2010) de manière à éviter tout désagrément.

4. De la conception à la mise en œuvre : retour d'expériences de terrain

À ce jour, les auteurs ont été amenés à travailler sur six dossiers d'extension verticale, parmi lesquels l'ISDND de Crépy-en-Valois (60) exploité par K2O (filiale de Sita-Suez Environnement). Un peu plus d'un an après la fin des travaux d'aménagement des nouveaux casiers en rehausse sur ce site (travaux auxquels l'entreprise GeoBTP a fortement contribué), un bilan a pu être dressé sur la conception du projet et les travaux réalisés sur ce site (Figure 7) :

- En dépit d'une configuration du site quelque peu complexe (combinaison des configurations 1 à 3 présentées sur la Figure 1) et d'une hauteur de déchets en place relativement importante (15 à 25 m en moyenne et jusqu'à 45 m sur une petite portion du site), le maintien à long terme des fils d'eau en fond de nouveau casier n'a pas soulevé de difficulté particulière, étant donné les directions des pentes initiales que les tassements ne vont faire qu'accentuer au fil du temps (lixiviats collectés par pompage au point bas du casier). De ce fait il n'a pas été nécessaire de rehausser spécifiquement la couche de forme.
- Compte tenu des hauteurs de déchets en place et des déchets rapportés (20 à 25 m en moyenne et jusqu'à 35 m localement), des tassements primaires compris entre 0,50 m et 2 m et des tassements secondaires compris entre 1 m et plus de 3,50 m ont été estimés 30 ans après la fin d'exploitation du site. Conséquence directe de ces tassements, un étirement général de la barrière d'un ordre de grandeur moyen de 0,2 à 0,5 % a été estimé (Figure 8). Localement, le risque de déformations plus importantes (notamment en cas de formation d'une cavité sous la barrière) a toutefois été pris en compte.
- Sur la base des résultats détaillés de l'étude, le choix du géosynthétique de renforcement s'est porté sur une géogrille de type Fortrac® R MPT (Huesker) avec fibres en polyvinyle d'alcool (PVA) avec enduction en polyamide. Des fibres en PVA (présentant un très faible allongement au fluage, comparativement à des fibres en polyester ou encore en PEHD) ont été sélectionnées pour une meilleure performance du produit dans la durée. À cet égard, le dimensionnement de la géogrille a été fait sur la base d'un fluage à 100 ans.
- Compte tenu du coût des géogrilles de renforcement, il est apparu au cours des travaux qu'un bon calepinage (avec livraison de rouleaux de linéaires différents numérotés) permettait de faciliter la pose des géogrilles et de limiter les recouvrements longitudinaux (et donc la "perte" de produit). Rétrospectivement, ce point s'est avéré d'autant plus important que le casier présentait des formes irrégulières (Figure 7).
- Enfin, étant donné la forte rigidité de la géogrille, il est apparu que des recouvrements longitudinaux étaient plus adaptés que des ancrages classiques en tranchée. Une première tentative d'ancrage en double tranchée réalisée sur une planche d'essai a confirmé qu'une telle mise en œuvre est susceptible d'entraîner une fragilisation au niveau des replats des tranchées d'ancrage mais aussi des mises en tension au niveau du GSB (formation de peaux de tambour). Par la suite, les lés de géogrilles ont donc été posés systématiquement à plat. La mise en place de plis d'aisance ou encore de sillons (Dubreucq et al., 2006) dans les zones les plus sujettes aux étirements est apparue sur ce site (et un second) comme une solution intéressante. Quand la géométrie des talus le permet, une solution d'ancrage provisoire par simple lestage au moyen de big-bags ou de plots en béton peut également s'avérer intéressante.



Figure 7. Mise en œuvre d'une géogridde de renforcement sous couche d'étanchéité passive dans le cadre de l'extension de l'ISDND de Crépy-en-Valois (planches K20).

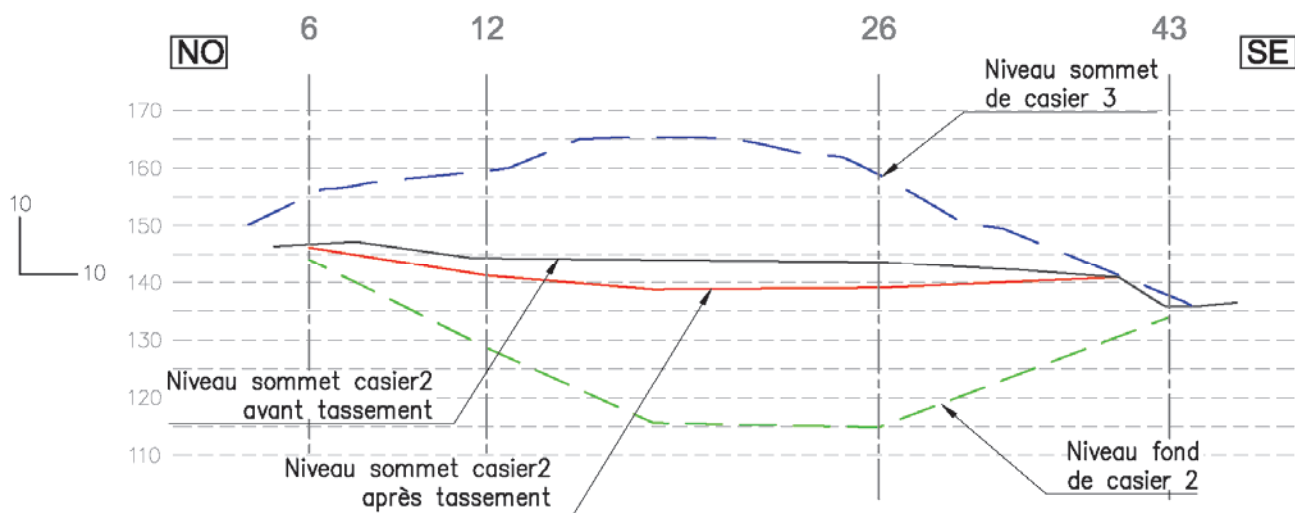


Figure 8. Coupe en travers du casier en place et du casier rapporté sur le site de Crépy-en-Valois : évolution prévue de la géométrie de la BSA/BSP après tassements.

5. Conclusions

Face aux difficultés à identifier des sites adaptés pour l'implantation de nouvelles ISDND, il a été rappelé que la tendance actuelle consistait à privilégier les extensions verticales de sites existants. Au-delà des avantages que représente ce mode de stockage, une prise en compte rigoureuse des phénomènes de tassements (réactivés sous l'effet du rechargement) s'avère toutefois nécessaire pour garantir le maintien à long terme des fonctions drainage et étanchéité de la barrière de sécurité active et passive (BSA/BSP), ainsi que les pentes d'écoulement de la couverture de surface du nouveau casier. Une méthode de conception itérative inspirée du modèle incrémental de prédiction des tassements (modèle ISPM) a été développée, adaptée à différentes configurations de terrain (rechargement en carrière, sur tumulus, à flanc de talus, etc.). Outre la détermination des pentes de la barrière de sécurité active et passive du casier en surélévation, cette méthode contribue également au dimensionnement du géosynthétique de renforcement nécessaire sous la couche d'étanchéité minérale.

Appliquée à ce jour sur six ISDND en France et à l'étranger, la démarche proposée présente une bonne robustesse et contribue à rationaliser la construction de casiers de stockage en extension verticale. Des progrès restent toutefois sans doute possibles. Aussi, compte tenu de l'actualité du thème abordé, les auteurs souhaitent encourager la création d'un groupe de travail, en partenariat avec les pouvoirs publics et les industriels du déchet, dans le but d'aboutir, sinon à une norme expérimentale, tout au moins à la rédaction de prescriptions techniques connues de tous et pas simplement appliquées au cas par cas comme cela se fait encore aujourd'hui.

En parallèle de cette démarche méthodologique et technique, la promotion et le soutien de travaux de recherche visant l'instrumentation d'un ou plusieurs sites pilotes en extension verticale (démarche initiée outre-Atlantique par le Ministère de l'Environnement du Québec depuis déjà quelques années) ou encore à titre d'exemple l'étude du comportement mécanique d'argiles et sols traités confinés sous fortes charges (éventuellement avec microfibrilles) couplées à des géosynthétiques d'étanchéité et de renforcement permettrait également de consolider le savoir-faire de la profession dans ce domaine.

6. Références bibliographiques

- ADEME (2005) Guide méthodologique pour le suivi des tassements des CSD de classe II. Téléchargement sur www.ecogeos.fr
- 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, 371-393.

- Bouthot M., Blond E., Quesnel P., Fortin A., Vermeersch O.G., Davidson S., Mlynarek J. (2003) Landfill extension using the piggy-backing technique: discussion and case study in Quebec. Proc. Sardinia 2003, 9th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy.
- Camp (2008) Comportement sous flexion d'une argile : application à la couverture d'une ISD TFA. Université de Grenoble.
- CFG (2011) Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets. Fascicule n°13 du Comité Français des Géosynthétiques.
- Dubreucq F., Bruhier J., Guillaud O. (2006) Une géogrid dans un parc paysager du Conseil Général du Val de Marne pour se protéger contre les fontis. *Actes Rencontres Géosynthétiques 2006, Montpellier - France.*
- Eid H.T. (2011) Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes. *Geotextiles and Geomembranes 29, 335-344.*
- Gendrin P., Sardain K., Esnault D., Salmon M. (2011) Drainage et étanchéité sous dalle béton pour construction de bâtiments sur sols pollués avec émanation de gaz toxiques. *Actes Rencontres Géosynthétiques 2011, Tours - France. 377-383.*
- 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.*
- Jessberger H.L. and Stone, K.J.L. (1991) Subsidence effects on clay barriers, *Geotechnique. London., 41(2), pp. 185-194.*
- MEEDDAT (2009) Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installations de stockage de déchets. Version 2. Février 2009.
- Norme XPG38-067 (2010) Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente.
- 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
- Viswanadham B.V.S., Jessberger H.L. (2001). Requirements for the design of geogrid reinforced clay liners of landfills. Proc. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, pp. 693-698.