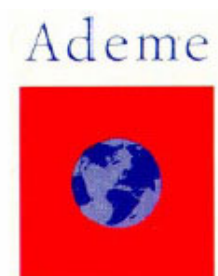


# Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de Classe II (Déchets ménagers et assimilés)



Direction Déchets et Sols



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

Illustration de couverture : photographie ANTEA

### **Comment se procurer ce Guide ?**

Par téléchargement (version Acrobat pdf – couleur) :

• **Sur le site web de l'Ademe :**

↵ [www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/tassements.htm](http://www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/tassements.htm)

• **Sur le site web du Lirigm :**

↵ [www-lirigm.ujf-grenoble.fr/Events/events.html](http://www-lirigm.ujf-grenoble.fr/Events/events.html)

© ADEME Editions, Angers 2005.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art. L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

## Sommaire

	Page
<u>Auteur, comités de pilotage et de relecture, Abréviations</u>	2
<u>Contexte et objectifs de ce guide</u>	3
<u>Evaluer les tassements : quels enjeux ?</u>	3
1. <u>Déchets et tassements : que faut-il savoir ?</u>	4
1.1 Quelle est la nature des déchets concernés par ce guide ?	4
1.2 Influence de la mise en œuvre du déchet sur son état initial	6
1.3 Vie d'un casier de stockage de déchet	8
1.4 Tassements des déchets : quels mécanismes, quels effets ?	9
1.5 Tassements différentiels	11
1.6 Evolution de la densité des déchets sous l'effet des tassements	12
2. <u>Mesure des tassements d'un massif de déchet</u>	13
2.1 Introduction	13
2.2 Suivi topographique de surface	14
2.2.1 Instrumentation de surface avec repères fixes	14
2.2.2 Instrumentation de surface sans repère fixe	16
2.2.3 Bilan comparatif des techniques de suivi topographique de surface	18
2.3 Instrumentation interne des tassements	18
2.4 Organisation pratique des campagnes topographiques	23
2.5 Estimation de la densité des déchets	25
2.6 Synthèse des essais de reconnaissance dans les déchets	27
3. <u>Prédiction des tassements des déchets</u>	28
3.1 Prédiction des tassements des déchets : adapter la démarche à l'objectif	28
3.2 Historique de la modélisation des tassements	28
3.3 Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements (modèle ISPM)	29
3.3.1 Présentation du modèle ISPM	29
3.3.2 Application du modèle ISPM par analyse directe (au stade de l'avant-projet)	32
3.3.3 Application du modèle ISPM par analyse inverse (calibration à partir de mesures de terrain)	33
3.3.4 Conclusion et perspectives d'application du modèle ISPM	35
3.4 Conclusion sur la prédiction des tassements	36
4. <u>Accélération des tassements et de la stabilisation mécanique des déchets</u>	37
4.1 Prétraitement bio-mécanique	37
4.2 Recirculation des lixiviats ('bioréacteurs')	38
4.3 Consolidation par chargement statique ou dynamique	39
5. <u>Contrôle des tassements différentiels</u>	41
5.1 Evaluation des tassements différentiels	41
5.2 Dispositions constructives en lien avec les couvertures de stockage	42
6. <u>Tassements des déchets au voisinage des talus</u>	43
6.1 Quel risque de rupture à long terme pour un tumulus de déchet ?	43
6.2 Analyse des déformations 3D au voisinage des talus	44
6.3 Dispositions sécuritaires en lien avec les instabilités de talus	45
7. <u>Conclusion générale</u>	45
<u>Bibliographie</u>	47
<u>Index</u>	49
Annexe 1 : Questionnaire relatif à l'application du modèle ISPM	50
Annexe 2 : Prédiction des tassements des déchets par méthode graphique : application aux sites orphelins	53
Annexe 3 : Algorithme du modèle ISPM à l'attention des bureaux d'étude	55

## **Auteur, comités de pilotage et de relecture**

Ce guide a été réalisé par Franck OLIVIER, chargé de recherche dans le cadre d'un Post-Doctorat ADEME - CREED au laboratoire LIRIGM (Université Joseph Fourier - Grenoble I).

### ➤ **Comité de pilotage de l'étude :**

- Jean-Pierre GOURC, LIRIGM
- Isabelle HEBE et Olga KERGARAVAT, ADEME
- Thomas LAGIER et Nathalie SKHIRI, CREED
- Franck OLIVIER, ADEME - CREED

### ➤ **Comité de relecture :**

- Thierry GISBERT, ARCADIS
- Jean-Claude GOUMAND, GEOLIA
- Dominique GUYONNET, BRGM
- Vincent MILANOV, FAIRTEC

L'ADEME et le Comité de pilotage remercient tout particulièrement les personnes contactées dans le cadre de cette étude.

## **Abréviations**

BMP :	Prétraitement bio-mécanique (acronyme de 'Bio-mechanical pretreatment')
BRGM :	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CSD :	Centre de Stockage de Déchets
DIB :	Déchets Industriels Banals
DRIRE :	Direction Régionale de l'Industrie, la Recherche et l'Environnement
GPS :	Système de positionnement terrestre (acronyme de 'Global Positioning System')
ISPM :	Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements (acronyme de 'Incremental Settlement Prediction Model')
LIRIGM :	Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique
OM :	Ordures Ménagères
PEHD :	PolyEthylène Haute Densité
STEP :	STation d'EPuration

## Contexte et objectifs de ce guide

L'étude méthodologique que nous présentons ici s'intègre dans le cadre plus large des programmes de recherche pluridisciplinaires initiés par l'ADEME sur la thématique du stockage des déchets ménagers et assimilés (Classe II). Elle s'appuie sur les travaux réalisés au laboratoire Lirigm (Université Joseph Fourier – Grenoble I) dans le cadre de deux thèses de doctorat ADEME (1996 - 2003) effectuées en partenariat avec deux exploitants de Centres de Stockage de Déchets (CSD) (Onyx – Creed et Sita) et un bureau d'études et d'ingénierie (Arcadis) :

- Thomas, S. (2000) Centres de Stockage de Déchets - Géomécanique des déchets et de leur couverture. Thèse de doctorat, Laboratoire Lirigm, Université de Grenoble, 327 p.
- Olivier, F. (2003) Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Thèse de doctorat, Laboratoire Lirigm, Université de Grenoble, 334 p. (téléchargeable sur [www-lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/foivier.html](http://www-lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/foivier.html)).

Ce manuel fait suite et complète le « **Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés** » (ADEME- BRGM, 2001). S'adressant en priorité aux exploitants de CSD et aux bureaux d'étude, il se fixe pour objectif :

- d'illustrer les enjeux du contrôle et de la prédiction des tassements des déchets sur sites ;
- de mettre à disposition des exploitants des outils méthodologiques relatifs à la mesure des tassements et la mise en valeur des données de terrain ;
- d'apporter enfin des éléments permettant d'orienter le suivi des CSD dans le sens d'une meilleure anticipation des tassements à long terme.

## Evaluer les tassements : quels enjeux ?

Les CSD deviennent des ouvrages de plus en plus techniques au sein desquels interagissent des matériaux naturels (argile, sable), artificiels (géosynthétiques) et des déchets dont le comportement est variable à la fois dans le temps et dans l'espace. Ces interactions restent difficiles à évaluer car, si l'on appréhende relativement bien le comportement des argiles ou des géosynthétiques en conditions normales, le comportement des déchets, par leur hétérogénéité et leur caractère évolutif, est encore marqué par un grand nombre d'inconnues.

Les enjeux liés au contrôle et à la prédiction des tassements sont importants. S'agissant des nouveaux sites ouverts, ceux-ci sont à la fois :

- d'**ordre sécuritaire et environnemental** : optimisation de la pose de la couverture, pérennité des couvertures sous l'effet des tassements (notamment différentiels), efficacité du captage des biogaz, stabilité des talus, etc.;
- d'**ordre économique** : détermination de la hauteur de déchet finale, prévision de la capacité de stockage correspondante et optimisation de la durée d'exploitation.

S'agissant des nombreux sites anciens (quelque 30 000 décharges brutes en voie de réhabilitation), la maîtrise des tassements, bien que plus complexe que pour des sites récents, est tout aussi primordiale dans la perspective d'une réhabilitation ou d'une requalification de ces sites. Se pose notamment le problème de la stabilisation mécanique des déchets, fonction de leur état de dégradation biologique et chimique.

# **1. Déchets et tassements : que faut-il savoir ?**

## **1.1. Quelle est la nature des déchets concernés par ce guide ?**

Le mot déchet est un terme générique désignant des types de matériaux d'origine et de composition très variables. La composition des déchets varie en effet dans le temps et d'une région à l'autre en fonction du degré de développement et d'urbanisation et du système de collecte. Les matériaux désignés dans ce guide par le terme 'déchet' incluent les **déchets ménagers bruts, résiduels ou traités** (OM, refus de tri, encombrants, boues, mâchefers non recyclables, etc.) et les **déchets assimilables aux déchets ménagers** tels que les Déchets Industriels Banals (DIB) ou encore les Déchets Verts (DV).

### ➤ **Composition physique du déchet**

Le déchet est un milieu constitué de trois phases solide, liquide et gazeuse en proportions variables. La phase solide, considérée comme inerte et non déformable pour les sols, comprend dans le cas des déchets un mélange de matière inerte, de matière déformable et de matière dégradable. La phase liquide, quant à elle, est composée de résidus provenant de la décomposition des déchets organiques et d'eau de percolation issue des précipitations. La phase gazeuse enfin est composée d'air et de gaz issus de la décomposition de la matière organique. Le mélange des phases liquides et gazeuses contribue à rendre le comportement du déchet complexe (conditions non saturées).

### ➤ **Granulométrie du déchet**

La distribution granulométrique du déchet joue un rôle important dans l'évolution des tassements dans la mesure où, comme pour les sols, elle influe sur la densité à la mise en place. Elle est étroitement dépendante de la composition du déchet et de son éventuel prétraitement (tri, broyage, maturation) avant stockage. Aux deux extrémités de l'échelle, on trouve les fines de criblages dont la taille n'excède pas quelques millimètres et les 'monstres' ou encombrants très volumineux (électro-ménager, mobilier, etc.) qui peuvent dépasser 1 m. Le rapport entre la taille des éléments fins et celle des éléments grossiers se traduit par conséquent par une gamme très étendue : de 1 à 1000 en moyenne.

### ➤ **Classification du déchet**

D'un point de vue purement mécanique, on peut classer les déchets d'après deux catégories de comportement '**sol**' et '**non-sol**'. La première catégorie rassemble les déchets ayant un comportement mécanique assimilable dans ses grandes lignes à celui d'un sol (débris de matériaux de construction, verre, cendres, mâchefers) tandis que la seconde regroupe des matériaux dont la nature et la structure ne peuvent être assimilées à celle d'un sol (déchets putrescibles, nappes plastiques, boues, encombrants, etc.).

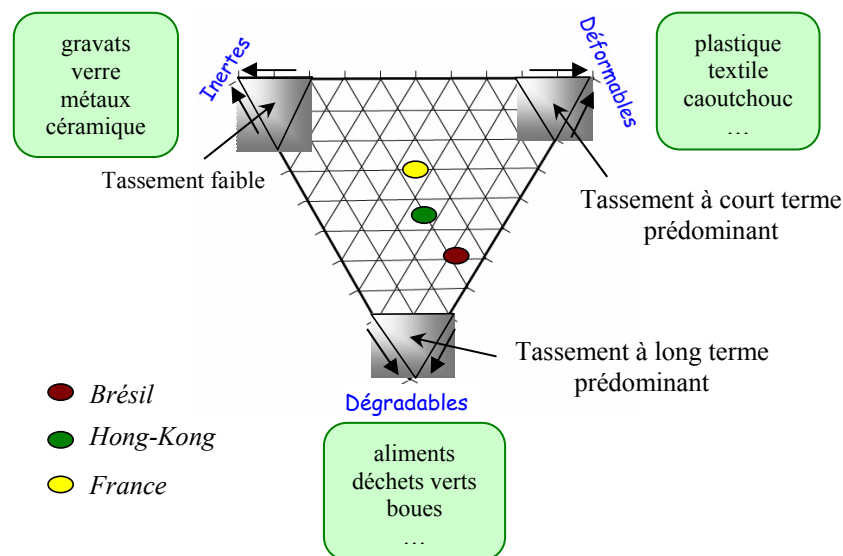
Si l'on observe au contraire les déchets suivant un critère biologique, il a été proposé de caractériser les déchets organiques en fonction de leur seule vitesse de dégradation à partir des trois classes suivantes :

- déchets **rapidement dégradables** : déchets verts, fruits et légumes, matières animales, etc.
- déchets **assez rapidement dégradables** : boues, graisses, etc.
- déchets **lentement dégradables** : papier, carton, bois, etc.

Une troisième classification présente l'avantage de considérer le déchet à la fois suivant les angles mécanique et biologique (Grisolia et al., 1995). Les constituants du déchet sont séparés là encore en trois catégories :

- **éléments 'inertes'** : matériaux ne voyant pas leur composition varier au cours du temps et dont la résistance à la déformation est élevée. Cette catégorie inclut les particules de sol mais aussi les gravats, le verre, les céramiques, les métaux, les plastiques durs et aussi le bois.
- **éléments 'déformables'** : papiers, plastiques en feuilles, textiles, caoutchouc, canettes et boîtes de conserve alimentaire, etc. Lorsqu'ils sont soumis à un chargement, ces matériaux tendent à tasser instantanément du fait des vides importants caractérisant leur arrangement initial. De plus, certains d'entre eux continuent à se déformer dans le temps sous charge constante.
- **éléments 'dégradables'** : cette classe d'éléments encore appelés 'putrescibles' regroupe les matériaux évoluant rapidement en terme de composition et de consistance. C'est le cas notamment des déchets alimentaires et des végétaux. La dégradation de ces substances induit des changements profonds dans la structure du matériau et s'accompagne d'une réduction du volume total occupé.

La classification de Grisolia et al. (1995) s'accompagne d'une représentation sous la forme d'un **diagramme triangulaire** permettant de comparer aisément la composition de déchets issus de sites et de régions du monde différentes (Figure 1).

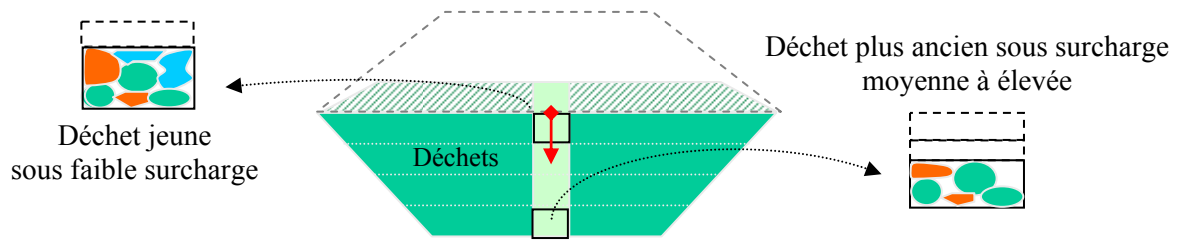


**Figure 1.** Représentation de trois déchets dans le diagramme triangulaire dérivé de Grisolia.

➤ **Evolution du déchet en fonction de la surcharge et du temps**

Bien que séduisante, la classification précédente ne rend cependant pas compte des changements d'état (et donc de caractéristiques) s'opérant en fonction de l'évolution de la surcharge et du temps (Figure 2). Bien qu'initialement incompressibles, certains encombrants ménagers peuvent devenir compressibles sous l'effet de surcharges importantes. Aussi, le bois passe progressivement d'un état inerte à un état compressible au cours de sa dégradation.

De manière générale, les éléments subissant une dégradation (physique ou biochimique) voient leur comportement mécanique évoluer jusqu'au stade ultime de constituants inertes dont le comportement équivaut in fine à celui d'un sol. Ceci s'accompagne d'une réduction de la taille des éléments constitutifs.

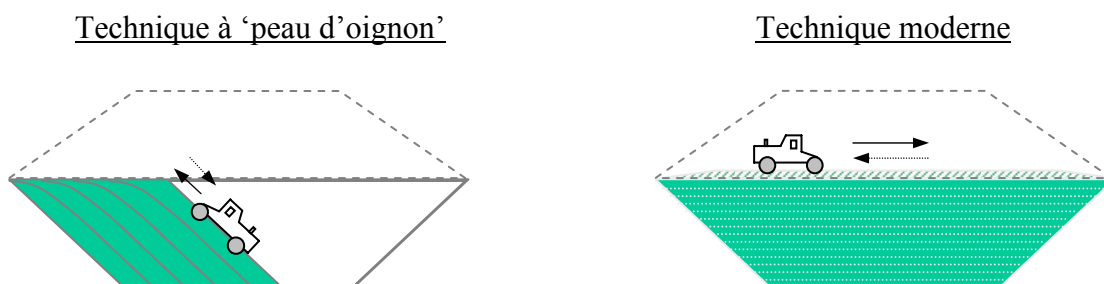


**Figure 2.** Compression d'une couche de déchet au cours du remplissage d'un casier de stockage.

A tout instant, le déchet pourra être caractérisé par un certain nombre de paramètres physiques, notamment sa masse volumique (masse de matière par unité de volume), sa teneur en eau (masse d'eau présente dans le déchet avant ou après stockage rapportée à la masse initiale du déchet juste avant stockage), sa porosité (volume des vides rapporté au volume total du déchet) et sa perméabilité (aussi appelée conductivité hydraulique). Pour plus de détails, on se reportera à la thèse de Olivier (2003) [www.lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/folivier.html](http://www.lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/folivier.html) (Chap 2).

### 1.2. Influence de la mise en œuvre du déchet sur son état initial

La mise en œuvre du déchet sur site consiste d'abord à étaler celui-ci (après déversement). Vingt ans en arrière, le déchet était régulièrement disposé par couches de 1 à 3 m faiblement compactées, empilées sur la hauteur (ou la mi-hauteur) du casier de stockage en avançant progressivement le front du dépôt (Figure 3). Cette technique dite à 'peau d'oignon' avait pour avantage de limiter les envols et les infiltrations d'eau dans le déchet.



**Figure 3.** Techniques d'étalement des déchets sur sites (a) technique dite à 'peau d'oignon' (b) technique moderne (couches fines).

Au cours des années 1990, les préconisations des pouvoirs publics couplées à la volonté des exploitants d'accroître la durée de vie de leurs sites tout en limitant envols et odeurs ont fait évoluer la technique du dépôt dans le sens d'une restriction de la taille des zones en exploitation. Les casiers de stockage sont désormais subdivisés en 'alvéoles' de 2 500 à 5 000 m<sup>2</sup> en moyenne. Si l'on exclut le cas des déchets en balle et des ordures broyées, le déchet est étalé en fines couches de 30 à 80 cm d'épaisseur compactées à l'aide d'engins spéciaux avec pour objectifs généraux de densifier le déchet afin de le rendre moins compressible (limitation des tassements post-exploitation) et d'augmenter la capacité de stockage du site (à volume donné).

L'effet des roues du compacteur assure :

- la **trituration du déchet** permettant de le déstructurer et de réduire la taille de ses éléments ;
- la **réduction des vides** sous l'effet de la charge surfacique (importance du poids de l'engin) ;
- l'**interpénétration des couches** successives (permettant d'éviter l'apparition de discontinuités internes).



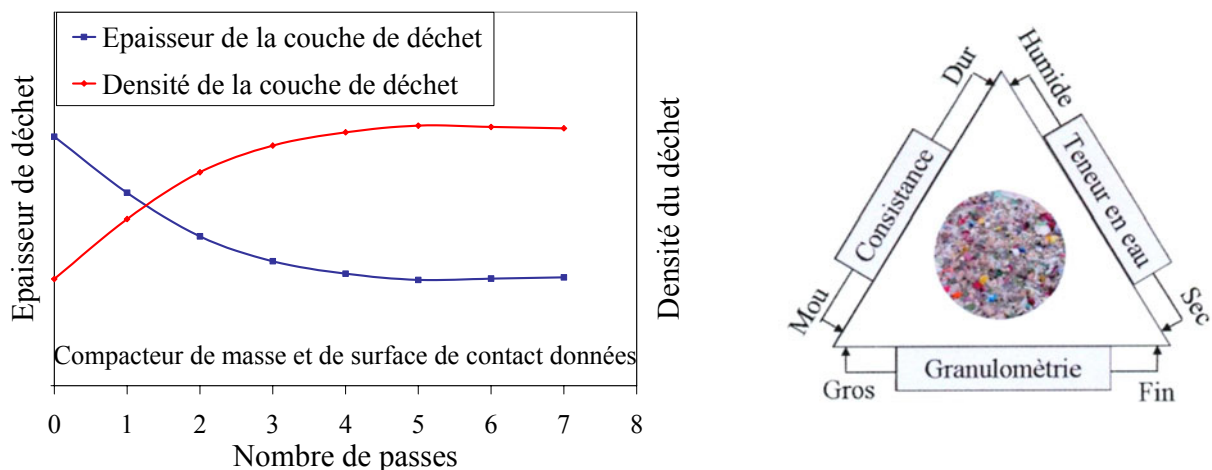
Pour remplir les objectifs précédents, les sites ont été équipés de compacteurs très lourds (20 à 80 tonnes) dotés de roues à bandages spéciaux (dents polygonales appelées abusivement ‘**pieds de mouton**’) (Figure 4). Dans le cas de déchets à forte teneur en DIB, ces derniers sont parfois par ailleurs doublés de compacteurs à ‘**couteaux**’, dont la fonction est essentiellement de déchiqueter le déchet.

Le résultat final du compactage dépend de :

- la composition du déchet : la présence d’une quantité importante de matières plastiques accroît l’élasticité du déchet, ce qui se traduit par une réduction de l’efficacité du compactage (effet ‘matelas’) ;
- la teneur en eau du déchet : certains constituants tels que papiers et cartons perdent leur rigidité à l’état humide ;
- la porosité (ou l’indice des vides) initiale du déchet à l’état foisonné lors du déversement ;
- la nature de l’engin utilisé : poids surfacique, dentition ;
- l’épaisseur des couches compactées et le nombre de passes : optimum généralement autour de 3 à 5 passages (Figure 5 (a)), certains constituants fibreux tendant à ‘foisonner’ au-delà.



**Figure 4.** Illustration des roues de compacteur couramment observées (a) couteaux (b) dents polygonales à double alignement (c) dents en forme de croix.



**Figure 5.** (a) Exemple de l’effet du nombre de passes sur l’épaisseur et la densité du déchet (b) Diagramme triangulaire relatif au compactage (Onyx , 2000)

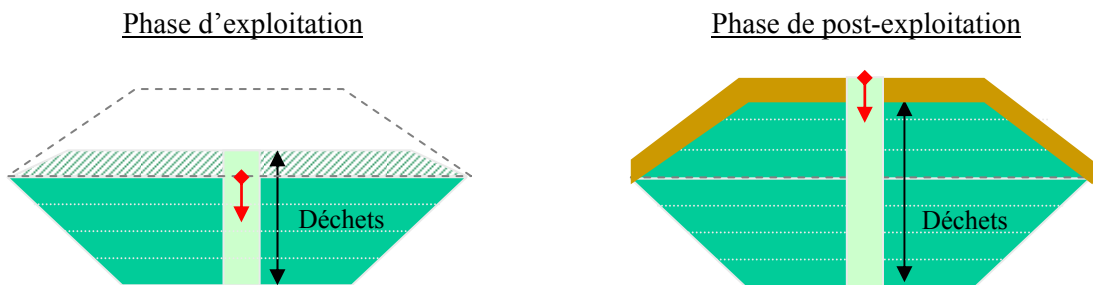
Au-delà des contraintes d’exploitation (fréquence de livraison des déchets variable), l’art du compactage inclut par ailleurs un certain nombre de règles d’homogénéisation empiriques difficiles à décrire (mélange des éléments grossiers avec des éléments fins, mélange des déchets

secs avec des déchets humides, mélange des déchets durs avec des constituants plus mous) qui rendent cette technique largement tributaire de l'appréciation du conducteur d'engin (Figure 5(b)).

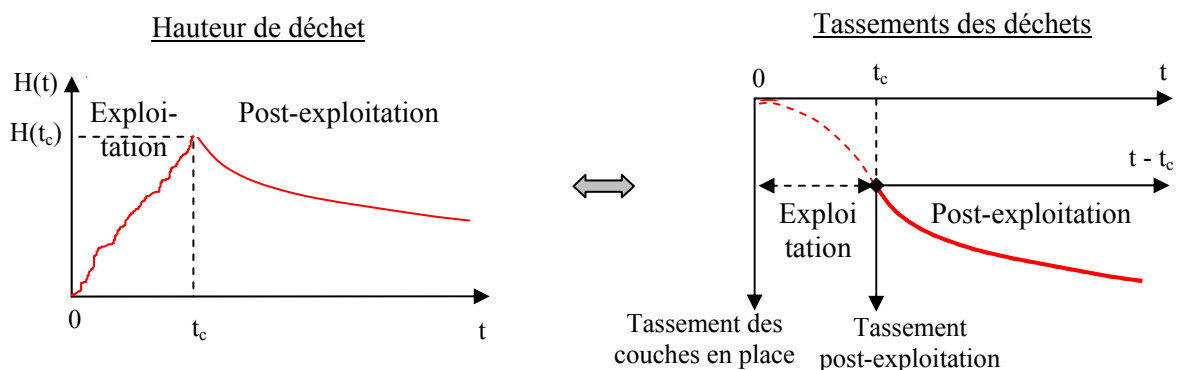
### 1.3. Vie d'un casier de stockage de déchet

Le comportement mécanique d'un massif de déchet peut être envisagé en deux étapes (Figure 6) :

- une **phase d'exploitation** ( $t < t_c$ ) : cette période correspond à la période de construction du massif considéré de durée  $t_c$  (i.e. mise en place des déchets et pose de la couverture finale). Les couches de déchet sont soumises à une surcharge croissante. Si la hauteur finale de la colonne de déchet (définie généralement avant ou immédiatement après la pose de la couverture) est fixée par arrêté préfectoral, la masse de déchet stockée dépendra du tassement observé au cours du remplissage. Celui-ci représente une durée variable de quelques semaines à quelques années suivant la taille du casier considéré et les flux de déchet stockés.
- une **phase de 'post-exploitation'** ( $t > t_c$ ) : le massif de déchet étant confiné par la barrière d'étanchéité de la couverture finale, les surcharges appliquées sur chacune des couches de déchet sont considérées constantes. Les tassements de fluage et la dégradation du déchet se poursuivent : c'est à l'exploitant qu'incombe la responsabilité d'assurer le drainage et le traitement des effluents liquides et gazeux mais aussi de veiller au contrôle et à la maintenance de la fonction des barrières de couverture subissant directement l'effet des tassements. Cette période de post-exploitation correspond actuellement en France à une durée de surveillance minimale de 30 ans à compter de la fin d'exploitation du dernier casier.



**Figure 6.** Schéma d'un casier de stockage (a) en phase d'exploitation (b) en phase de post-exploitation.



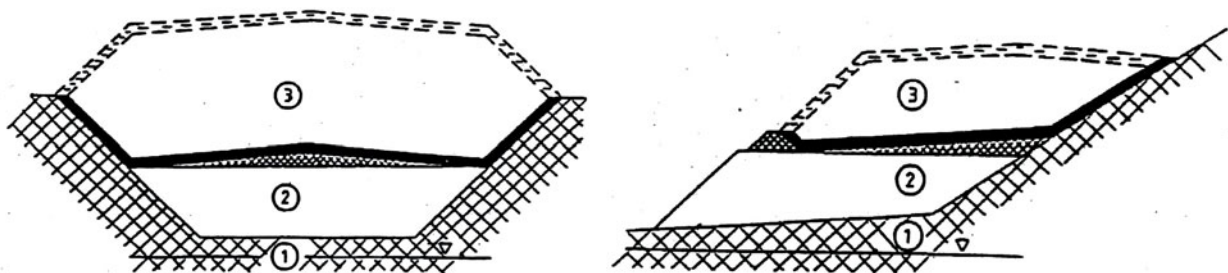
**Figure 7.** Evolution (a) de la hauteur de déchet (b) du tassement de surface associé au cours des phases d'exploitation et de post-exploitation d'un CSD.

A titre d'illustration, l'évolution de la hauteur de déchet et les tassements associés observés au cours des phases d'exploitation et de post-exploitation ont été représentés sur la Figure 7. Les

tassements sont initiés dès la fin de la mise en place de la première couche de déchet ; en revanche, leur mesure ne débute en général qu'en fin d'exploitation (au temps  $t_c$ ) de sorte que la partie initiale de la courbe reste inconnue (Figure 7 (b)).

Une dernière phase est parfois considérée, dite **phase de 'post-gestion'**, à l'issue de la période de surveillance du dernier casier en date. A ce stade, le déchet est considéré comme inerte et les tassements sont supposés sans effet sur les éventuels projets de requalification du site. Dans la pratique, très peu d'observations ont été réalisées sur des périodes supérieures à 10 ans. Un des rares exemples de suivi sur un déchet âgé – i.e. le CSD de Saint-Michel (Montréal) caractérisé par une grande hauteur de stockage ( $H(t_c) > 60$  m) – a pourtant indiqué que les tassements pouvaient se prolonger de manière non négligeable au-delà des 30 ans de post-exploitation.

Enfin, évoquons brièvement la technique d'**extension verticale d'anciennes décharges** non protégées (**'piggy-backing'**) qui consiste en une reprise d'exploitation d'un site fermé. Devenue une pratique courante aux Etats-Unis – pas moins de 75 extensions de ce type rapportées depuis 1987 par Bouthot et al. (2003), le **'piggy-backing'** présente un certain nombre d'avantages : augmentation des durées d'exploitation sans extension de l'emprise au sol, optimisation des installations en place et simplification des procédures d'autorisation administrative. Compte tenu toutefois de la réactivation des tassements de la colonne de déchet inférieure (déchet ancien) sous l'effet de la surcharge (déchet jeune), cette technique n'est pas sans présenter de risque pour la barrière d'étanchéité intermédiaire (fond du nouveau casier = couverture de l'ancien casier) (Figure 8). Elle requiert par conséquent une réflexion particulière et une conception soignée.



**Figure 8.** Illustration d'une rehausse de casier (a) en carrière (b) à flanc de coteaux.

#### ➤ Rôle de la couverture dans la vie d'un casier de déchet

La couverture de surface d'un CSD joue un rôle très important sur le devenir à long terme du site et sur son impact sur l'environnement. Les fonctions que doivent remplir les éléments constitutifs d'une couverture sont multiples : drainage des effluents gazeux, étanchéité, filtration, protection contre l'intrusion, support du couvert végétal, réintégration paysagère, etc. Or, sous l'effet des tassements, des modifications du modelé de la couverture de stockage apparaissent qui induisent des contraintes mécaniques pouvant entraîner sa détérioration accélérée. Face à cette dynamique complexe, la couverture d'un CSD a la redoutable tâche de garantir la pérennité de ses performances. La difficulté de cette tâche explique pourquoi, en matière de couvertures, il n'existe pas de solution unique. Outre les caractéristiques d'étanchéité des couvertures de surface (couvertures semi-perméable / imperméable), la principale difficulté liée à leur conception a trait à la définition d'un objectif de durée de fonctionnement.

### 1.4. Tassements des déchets : quels mécanismes, quels effets ?

Les tassements, dont la vitesse (déplacement vertical par unité de temps) tend à décroître au cours du temps, résultent grossièrement de quatre actions distinctes :

### • Actions mécaniques

Les actions mécaniques sont en premier lieu liées à l'application de surcharges. Celles-ci entraînent, comme pour tout milieu granulaire, un réarrangement, une distorsion et une réorientation des divers composants du déchet. A l'image de certains sols fins (argiles molles, tourbes, vases), ces phénomènes de 'fluage' peuvent se prolonger à charge constante au cours de très longues périodes.

### • Actions biochimiques

La décomposition (aérobie puis anaérobie) de la matière organique du déchet entraîne un transfert de masse de la phase solide vers les phases gazeuse et liquide. Compte tenu de la répartition inégale de l'eau dans le déchet (ne garantissant pas une assimilation totale du substrat organique par les micro-organismes), cette perte de masse solide dépasse rarement 20 % après 30 ans. Une désagrégation partielle de la structure du déchet est occasionnée, phénomène qui s'accompagne d'un tassement à moyen et à long terme. Le comblement de l'espace libéré n'est cependant que partiel du fait de la structure très hétérogène des matériaux.

### • Actions physico-chimiques

Il s'agit de la corrosion des matériaux ferreux et exceptionnellement de phénomènes d'oxydation et de combustion. En règle générale, l'action des transformations physico-chimiques intervient de manière marginale vis à vis de la dégradation biochimique. C'est un processus très long et par conséquent encore méconnu. Il a pour effet de réduire la taille des constituants du déchet et de libérer des espaces précédemment fermés.

### • Tamisage et percolation

La dégradation du déchet s'accompagne, en plus de la perte de masse, d'une diminution de la taille caractéristique des constituants du déchet. Ceci entraîne un tamisage des particules dégradées au travers des macro-pores (mécanisme accentué par les vibrations). Ce phénomène continu à l'échelle d'un casier est ponctué de phases soudainement accélérées qui s'apparentent à des effondrements de la structure. Il dépend en grande partie de la composition et de la distribution en taille des constituants du déchet. L'eau qui percole à travers les résidus accentue cette migration des éléments fins vers les vides ouverts.

Les mécanismes présentés précédemment ont pour caractéristique d'interagir entre eux. A titre d'exemple, la compression mécanique influe sur le régime des percolations (captage de l'eau dans les micro-pores) tandis que la dégradation biochimique engendre un tamisage accru. Les actions se superposent de manière complexe au cours du temps. Leur association peut néanmoins être représentée à partir de deux composantes distinctes :

- un **tassement primaire (court terme)** résultant du chargement par les déchets sus-jacents et la couverture. Cette composante de durée très faible (quelques jours) est généralement supposée indépendante du temps. Le **tassement dit instantané** est considéré inclus dans le tassement primaire, à l'exception du tassement résultant directement du compactage des déchets qui n'est pas comptabilisé (l'épaisseur et la masse volumique initiale d'une couche élémentaire de déchet étant définies après compactage) ;
- un **tassement secondaire (long terme)** supposé indépendant de la charge et pouvant se poursuivre au cours de plusieurs décennies. Il résulte essentiellement de la décomposition de la matière organique, du tamisage des fines et des interactions associées. C'est cette composante secondaire qui a le plus d'incidence sur les performances de la couverture au cours du temps puisque la totalité du tassement primaire a lieu avant mise en place de la couverture.

Ces tassements ont une influence sur les caractéristiques hydro-physiques du déchet. La diminution de sa porosité se traduit en effet par une baisse marquée de la conductivité hydraulique, avec des conséquences souvent déterminantes pour le régime hydrique, la biodégradation du substrat organique et les propriétés mécaniques du matériau. Si cette baisse de la perméabilité semble favorable à la biodégradation (contact plus intime entre eau et particules) jusqu'à un certain seuil, elle est susceptible au-delà d'engendrer la formation de zones sèches et l'apparition de nappes perchées pouvant entraîner des instabilités dans le massif de déchet.

Notons que des tassements peuvent également apparaître en surface suite à la déformation excessive du sol de fondation, notamment dans le cas de sols sous-consolidés (argiles molles, tourbes, vases) certes rares en France. Une étude géotechnique permet d'évaluer la compressibilité du sous-sol sous l'effet des contraintes (consolidation primaire) et du temps (consolidation secondaire).

Bien que déterminants en vue de l'évaluation des capacités de stockage de casiers de déchet, les tassements survenant en phase d'exploitation sont très rarement mesurés. Seuls quelques sites pilote ont été instrumentés en ce sens mettant en évidence des tassements (primaires) compris entre 5 et 20 % de la hauteur initiale de déchet pour des surcharges équivalentes au poids de colonnes de déchet de 5 à 40 m. Dans le cas de déchets faiblement compactés, des valeurs supérieures à 20 % sont parfois observées.

De nombreuses valeurs de tassements (secondaires) post-exploitation ont en revanche été publiées dans la littérature. Il reste cependant difficile d'évaluer avec précision leur tendance sur de longues périodes car d'une part les suivis topographiques rapportés dépassent rarement 4 à 6 ans, d'autre part ceux-ci sont fréquemment initiés avec retard (après la fin d'exploitation). L'extrapolation des mesures précédentes sur une période de 30 ans donne toutefois une estimation de la déformation généralement comprise entre 8 et 30 % (pour une moyenne proche de 15 à 20 %).

## 1.5. Tassements différentiels

Les tassements de surface ne sont jamais totalement uniformes. Ceci résulte en particulier de :

- l'hétérogénéité du matériau déchet ;
- son épaisseur variable (notamment au voisinage des flancs de casier) ;
- son mode de mise en place (ségrégation ou non des flux, compactage) ;
- son mode de gestion post-exploitation (infiltrations d'eau, recirculation des lixiviats, etc.).

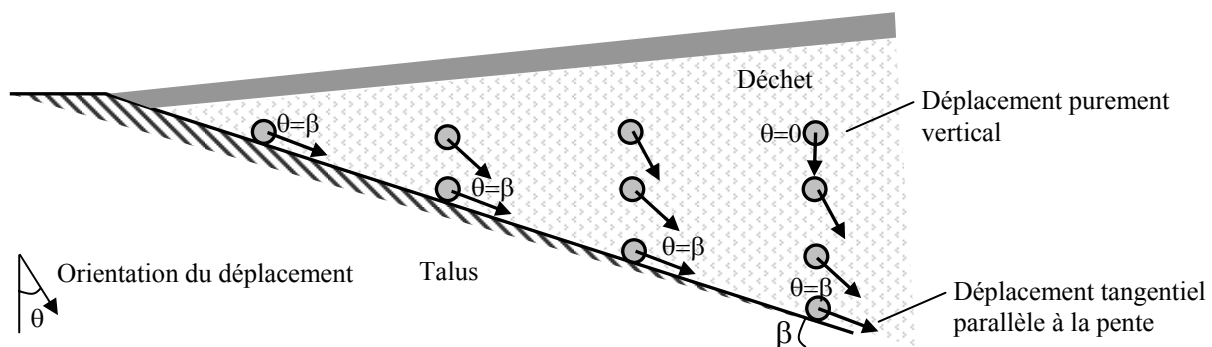


**Figure 9.** Illustration des tassements différentiels sur site (a) formation de dépressions sur la couverture de casier (b) apparition de points bas le long du réseau de drainage des biogaz (Source : ANTEA).

A la surface des casiers de stockage apparaissent ainsi des **tassements différentiels** qu'il convient de maîtriser car ils sont susceptibles d'entraîner des déformations (effondrements localisés ou flexion) préjudiciables pour le système d'étanchéité - drainage de la couverture (fissuration de la couverture minérale, poinçonnement de la géomembrane, rupture du système de drainage). Ces tassements différentiels peuvent en outre engendrer des inversions de pente (pente initiale réglementaire  $\geq 3\%$  en partie sommitale) qu'il convient de prévenir pour éviter l'accumulation d'eau en surface (Figure 9 (a)) et garantir le bon fonctionnement des réseaux d'évacuation des biogaz (Figure 9 (b)).

Par ailleurs, les tassements sont souvent perturbés par les puits : un meilleur drainage des lixiviats et des biogaz à leur voisinage, un état lâche du déchet à proximité des puits (faible compactage dans le cas de puits implantés en phase d'exploitation) peuvent impliquer un tassement accentué. Dans certains cas, le frottement négatif du déchet par frottement le long des parois de ces mêmes puits peut entraîner l'effet contraire (diminution très localisée des tassements).

La séparation des alvéoles par des merlons de terre en forme de 'sapin de Noël' est également susceptible d'induire des tassements différentiels au voisinage de ces hétérogénéités. Il en va de même des barrières externes. Il a été montré expérimentalement que les tassements sont perturbés au voisinage des talus de fond et que les déplacements des déchets ne sont plus verticaux mais tangents aux flancs par suite du glissement de ces derniers le long des barrières d'étanchéité - drainage (Figure 10). Cette forte compressibilité du déchet en bordure de casier est accentuée par la moindre qualité du compactage.



**Figure 10.** Déplacement des déchets aux abords de la barrière de fond de casier (Thomas, 2000).

Enfin, d'importants tassements différentiels peuvent apparaître dans le cas de rehausse d'anciens casiers suivant la technique du *'piggy-backing'* (§ 1.3). L'installation de radiers renforcés par géosynthétiques en fond de nouveau casier peut s'avérer nécessaire pour mieux répartir les charges verticales et ainsi minimiser les tassements différentiels.

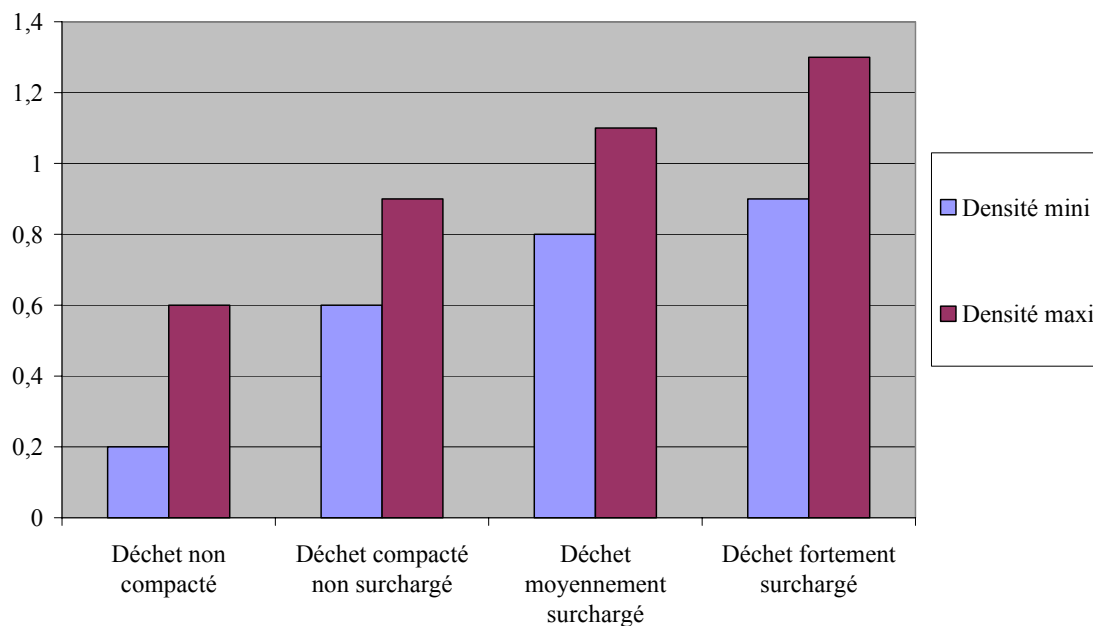
## 1.6. Evolution de la densité des déchets sous l'effet des tassements

Sous l'effet du compactage puis des tassements primaires et secondaires, les vides présents entre les constituants du déchet (initialement de taille importante) tendent à se rétrécir, ce qui entraîne une augmentation de la quantité de matière solide par unité de volume. Cette augmentation peut être exprimée indifféremment au travers de la **masse volumique**  $\rho = m/V$  [tonne/m<sup>3</sup>] (exprimée plus communément sous le terme de **densité**  $\rho/\rho_w$  [sans unité] où  $\rho_w$  représente la masse volumique de l'eau) ou du **poinds volumique**  $\gamma = \rho \cdot g$  [kN/m<sup>3</sup>] du matériau stocké.

La densité du déchet peut être évaluée à partir de :

- mesures locales généralement réalisées en surface (excavations à la pelle : § 2.5) et qui, pour un déchet donné, apportent une bonne indication sur l'efficacité du compactage ;
- mesures globales (sur l'ensemble de la hauteur d'une alvéole par exemple) qui prennent en compte les tassements survenus au cours de l'exploitation.

La littérature est riche en valeurs de densité mais celles-ci varient très fortement suivant la nature et l'état du déchet et leur analyse requiert un minimum de données hélas pas toujours disponibles. Suivant que l'on considère un déchet foisonné (immédiatement après déversement), un déchet fraîchement compacté ou encore un déchet soumis à un chargement, des valeurs de densité très différentes sont observées, comprises entre 0,2 et 1,3 (Figure 11). A l'échelle d'un casier en fin d'exploitation, on notera que la densité est généralement comprise entre 0,7 et 1,1 (pour une moyenne voisine de 0,9 à 1).



**Figure 11.** Valeurs de densité (mini/maxi) d'un déchet ménager brut.

## **2. Mesure des tassements d'un massif de déchet**

### **2.1. Introduction**

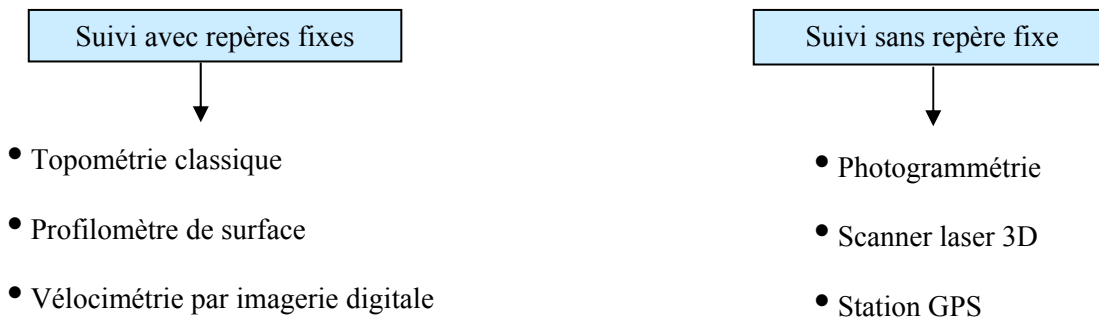
Les exploitants de CSD sont soumis réglementairement à l'obligation de fournir chaque année un relevé topographique de surface de leur site représentant l'ensemble des aménagements des casiers (en phase d'exploitation comme en phase de post-exploitation). Dans la pratique, ces relevés restent cependant trop souvent sous-exploités.

Certes, l'instrumentation de décharges est moins aisée que celle de sites géotechniques standard, les principales difficultés résultant notamment du passage répété d'engins de travaux et de maintenance et de l'amplitude importante des déformations. Il n'en demeure pas moins que l'interprétation de mesures soignées permet :

- suivant une **démarche sécuritaire** : la surveillance des tassements sur l'ensemble du site, y compris au voisinage de digues, talus et puits de collecte des biogaz ;
- suivant une **démarche économique** : la calibration de paramètres de modélisation en vue de la prédiction des tassements sur l'ensemble d'un site (casier instrumenté + casiers en projet).

## 2.2. Suivi topographique de surface

Le suivi des tassements se résume typiquement à des mesures effectuées en surface de casier à partir de repères matérialisés. Dans le cas le plus favorable, ces mesures peuvent être effectuées lors d'un arrêt d'exploitation (sur tout ou partie du casier) pendant une durée minimale de 8 à 12 mois. Si une phase d'arrêt n'est pas envisagée, l'instrumentation peut intervenir, comme cela se fait fréquemment, à l'issue de la fin d'exploitation du casier.



Bien que méconnus, des dispositifs de mesure ne nécessitant pas la pose de repères fixes se développent depuis quelques années. Ces techniques représentent une alternative intéressante, notamment dans le cas de sites de grande taille, et sont appelées à moyen terme à se développer aux dépens de la topométrie classique.

### 2.2.1. Instrumentation de surface avec repères fixes

#### ➤ Topométrie classique

La topométrie classique est réalisée à l'aide d'un **tachéomètre électronique** (encore appelé **station totale** dans sa version automatisée) faisant à la fois office de distance-mètre et de théodolite. Par triangulation à partir de 2 points de référence implantés en zone fixe (pylône EDF, borne en périphérie de site, etc.), l'instrument est capable de déterminer les coordonnées 3D (x, y, z) de tout point matérialisé au moyen d'une pige équipée d'un réflecteur. La limite de visée du tachéomètre étant de l'ordre de 500 m (sans dégradation excessive de la précision :  $\pm 3$  à 5 mm), des points de référence supplémentaires seront implantés sur le pourtour du site si nécessaire.

Le canevas de points prédéfinis est matérialisé par des repères scellés pouvant prendre diverses formes (Figure 12) :

- piquets de bois (pérennité sensible toutefois au gonflement - retrait des couvertures argileuses) ;
- bornes plastiques ancrées dans la couverture minérale à l'aide de pattes ou ergots ;
- repères cimentés coulés à même la nappe synthétique (couverture temporaire) ;
- plaques de surface et tiges soudées implantées à l'interface déchet - couverture.



Piquet de bois



Borne ancrée



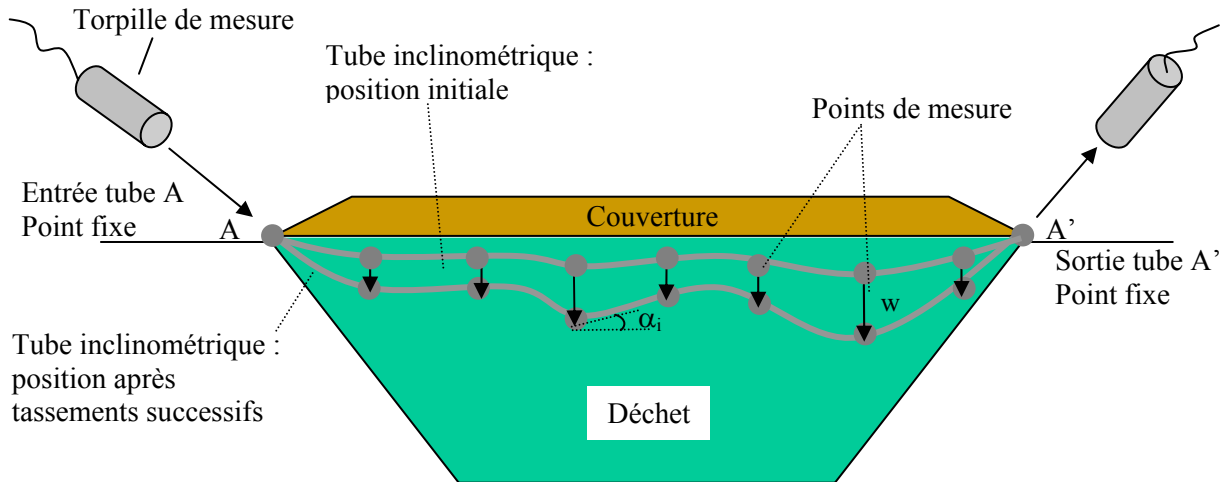
Repère cimenté

**Figure 12.** Illustration des repères topographiques de surface courants.



### ➤ Profilomètre (ou inclinomètre horizontal) de surface

Les profilomètres sont constitués de tubes souples en PEHD installés à l'interface déchet – couverture en fin d'exploitation ou alternativement à l'intérieur du massif de déchet en cours d'exploitation (§ 2.3). Les déplacements verticaux du tube (horizontal) sont mesurés à l'aide d'une torpille (sonde à fonctionnement hydrostatique ou accélérométrique) tirée d'une extrémité à l'autre du tube à l'aide d'une cordelette de nylon pré-installée (Figure 13). Les mesures sont repérées par rapport aux points d'entrée - sortie de la torpille (Figure 14), dont les positions sont suivies par nivellement classique.



**Figure 13.** Schéma de principe du dispositif profilométrique.

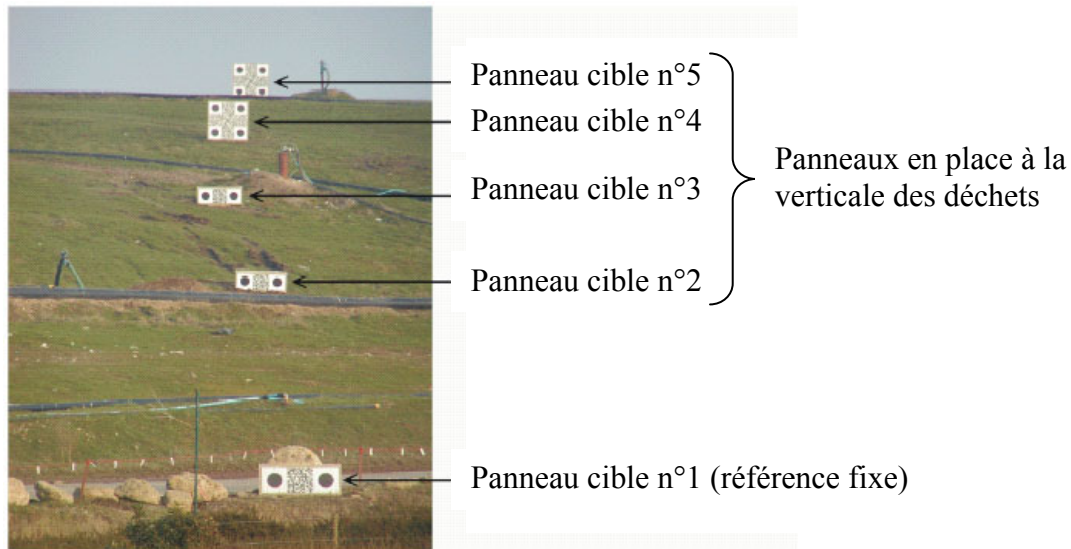
Les jauges hydrostatiques autorisent des mesures sur une distance maxi de l'ordre de 200 m. La plage de tassement maxi est de l'ordre de 3 à 5 m et la précision de la mesure équivaut à  $\pm 1$  cm. Quant aux sondes accélérométriques (relevant les angles  $\alpha_i$  formés par l'axe de la sonde et l'horizontale), elles assurent une précision sensiblement meilleure ( $\pm 5$  mm). Si cet appareillage présente l'avantage de fournir un profil de tassement complet à un niveau donné (mesure tous les 1 à 2 m en général) et donc une représentation des tassements différentiels, son utilisation nécessite toutefois l'accès aux entrées - sorties des tubes horizontaux compatible avec un stockage en tumulus (Figure 14 (a)). De plus, le passage de la sonde doit être assuré après flexion du tube (section à définir en conséquence). Notons enfin que certains modèles dotés d'un pivot en bout de tube autorisent des mesures à partir d'une seule entrée.



**Figure 14.** Illustration d'une mesure profilométrique (CSD de Lapouyade) (a) Technicien opérateur en action à partir d'un cuvelage en béton fondu dans la digue périphérique (b) Gros plan sur la sonde accélérométrique à l'entrée du cuvelage.

### ➤ Vélocimétrie par imagerie digitale

Développée initialement dans le domaine de la mécanique des fluides, la technique de la vélocimétrie par imagerie digitale est basée sur l'analyse d'images sous la forme de séries de matrices dont chaque terme représente, pour un pixel donné, l'intensité relative à 3 couleurs de référence (rouge, vert, bleu) (White et al., 2003). Cette méthode a été adaptée dans le but de permettre un suivi de repères matérialisés par des panneaux cible (ancrés dans la couverture au moyen de plots en béton) à partir d'un ou plusieurs appareils photo numérique fixes (Figure 15).



**Figure 15.** Illustration des panneaux cible installés sur le site de White's Pit (White et al., 2003)

La résolution et la précision de ce dispositif de mesure sont similaires à celles d'instruments topographiques conventionnels. Le principal avantage de cette technique tient au fait qu'elle permet un suivi des tassements en continu par transfert électronique de données (outil de surveillance). Cette technique permet par ailleurs de suivre plusieurs repères à partir d'une seule image. Compte tenu cependant de l'encombrement des panneaux de mesure, leur nombre sera nécessairement limité par l'exploitant. En vue de l'obtention de mesures 3D, plusieurs appareils photos sont associés ainsi qu'une reconstruction de type photogrammétrique (§ 2.2.2). Dans le cas courant où l'on s'intéresse exclusivement aux déplacements verticaux, la recombinaison d'images 2D n'est toutefois pas nécessaire.

#### **2.2.2. Instrumentation de surface sans repère fixe**

Un certain nombre d'appareillages numériques permettent de suivre les déplacements 3D de la surface de casiers de stockage sans recours à des repères fixes.

### ➤ Photogrammétrie terrestre ou aérienne

La photogrammétrie est une technique permettant d'exécuter des mesures spatiales à partir de photographies argentiques ou numériques. Comme la plupart des méthodes géodésiques, la photogrammétrie fonctionne sur le principe de la triangulation. En prenant des photographies à partir de 2 points distincts définissant 2 lignes de vue, les photographies 2D sont recoupées mathématiquement pour fournir des coordonnées 3D. Suivant le processus inverse de la photographie, la photogrammétrie permet de restituer un espace 3D à partir de photographies 2D. Sa résolution est excellente ; quant à sa précision, elle est à la fois fonction de la taille des objets visés, du nombre de photographies (recouvrement nécessaire entre photos), de la résolution de la caméra et de la géométrie du site. Pour un point donné, la précision de mesure est relativement modeste (2 à 3 cm) mais compte tenu des nuages de points relevés, une précision réelle de l'ordre de quelques millimètres est atteinte après post-traitement.

Dans le cas de sites très étendus ou en relief, cette technique est préférablement conduite par imagerie aérienne (à partir d'un hélicoptère par exemple), ce qui représente un gain de temps important. On trouve référence dans la littérature de plusieurs sites étrangers suivis par photogrammétrie (Hanovre, Montréal, Vancouver, Hong-Kong, etc.).

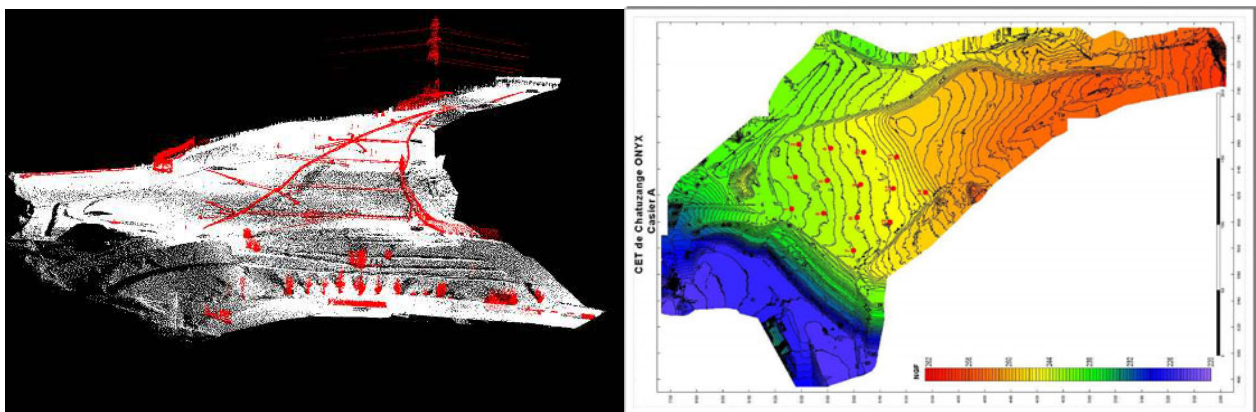
➤ **Scanner laser 3D**

Le scanner laser s'apparente à un gros appareil photo numérique à champ de vision étendu (360°), longue portée (800 m maxi) et vitesse de numérisation élevée (jusqu'à 10 000 points enregistrés à la seconde). Il est utilisé à partir de positionnements multiples, fixes ou mobiles, de manière à saisir intégralement la surface des casiers de stockage de déchet (Figure 16).



**Figure 16.** Illustration du suivi des tassements par scanner laser 3D (a) appareil monté sur tourelle fixe (b) appareil monté sur véhicule mobile (Source : <[www.riegl.co.at](http://www.riegl.co.at)>)

La technique repose sur le principe du 'temps de vol' nécessaire à chaque impulsion laser pour atteindre une surface et retourner au scanner (sans l'aide de réflecteurs). Après acquisition, les données sont traitées à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sous la forme d'un nuage de points. Un post-traitement est ensuite effectué permettant de traduire les données brutes en cartographie 3D (contours de surface, profils singuliers, cartographie des structures) facilement exploitable (Figure 17). La résolution angulaire d'un tel appareil atteint 0,0025 ° (soit 1 point tous les 4 mm à 100 m) et sa précision avoisine 5 à 10 mm dans des conditions optimales de post-traitement (filtrage de la végétation et échantillonnage). Dans le cas de sites de grande taille, le scanner laser est remplacé par le radar laser dont les capacités sont très supérieures.



**Figure 17.** Exemple du suivi de l'alvéole B du CSD de Chatuzange (a) nuage de points 3D de la couverture et des structures de surface (b) Courbes de niveaux obtenues après post-traitement (Source : ATM3D <[www.atm3d.com](http://www.atm3d.com)>).

### ➤ Station GPS ('Système de Positionnement Global')

Le GPS est un système de navigation radio fonctionnant à partir de 24 satellites en orbite autour de la terre. Les satellites sont disposés de telle manière que 4 satellites surplombent l'horizon à tout instant, quelque soit la position considérée à la surface du globe. Chaque satellite comprend un ordinateur embarqué, une horloge atomique et une radio lui permettant de calculer sa position exacte. Au sol, le récepteur GPS est lui aussi doté d'un ordinateur qui 'triangularise' sa position propre (longitude, latitude, altitude) à partir des ondes reçues par les satellites.

La précision des appareils GPS s'est largement améliorée au cours des dernières années. Il est aujourd'hui possible de prédire les tassements en temps réel avec une précision voisine du centimètre. Fixés sur des compacteurs, les appareils GPS permettent en outre de lever les cotes d'exploitation à des intervalles rapprochés, fournissant ainsi un accès quasi immédiat à la densité des déchets.

### 2.2.3. Bilan comparatif des techniques de suivi topographique de surface

Les avantages et les inconvénients relatifs aux techniques détaillées précédemment sont regroupés dans le Tableau 1.

**Tableau 1.** Avantages et inconvénients des techniques de suivi topographique de surface

Appareillage	Maîtrise actuelle	Avantages	Inconvénients
Topométrie classique	parfaite (cabinets géomètre)	- Précision des mesures - Equipement / technicité limité - Coût raisonnable	- Temps de mesure excessif pour un grand nombre de points
Profilomètre de surface	satisfaisante (bureaux d'étude spécialisés)	- Profils de mesure continus dans l'espace : très intéressant pour le suivi des tassements différentiels	- Suivi unidirectionnel le long des profils pré-positionnés - Application limitée
Vélocimétrie par imagerie digitale	R & D	- Appareillage permanent : suivi en continu dans le temps - Bon marché	- Encombrement important des repères - Points de visée peu nombreux
Photo-grammétrie	satisfaisante (bureaux d'étude spécialisés)	- Solution adaptée aux sites étendus - Imagerie numérique souple et puissante : profils multiples	- Précision médiocre en l'absence de post-traitement - Coût élevé à très élevé
Scanner laser 3D	R & D (développement très prometteur)	- Excellente résolution - Imagerie numérique à la fois souple et puissante	- Technique récente : maîtrise en cours d'acquisition - Coût élevé
Station GPS	satisfaisante	- Embarquable sur engins motorisés - Unique moyen de mesure en présence de végétation faisant écran	- Précision médiocre en l'absence de post-traitement - Post-traitement long et onéreux

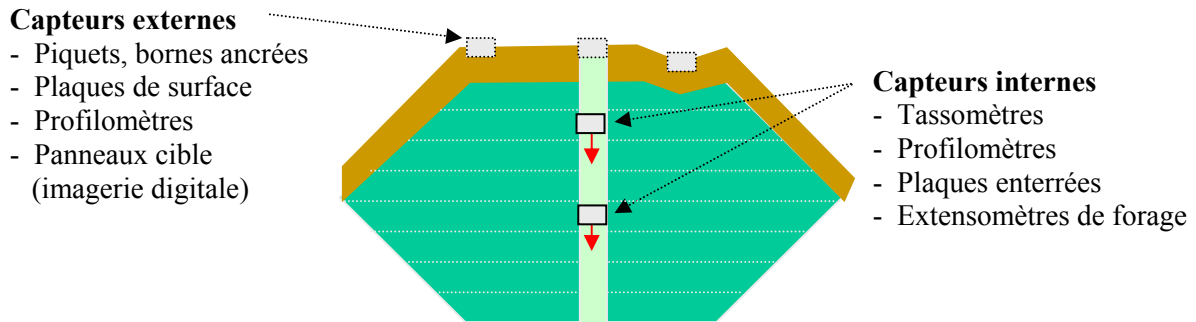
### 2.3. Instrumentation interne des tassements

En complément de l'instrumentation de surface, il peut s'avérer intéressant de mettre en place des capteurs internes dans le massif de déchet. Ces derniers permettent de suivre le tassement à un certain niveau sous la couverture pour un déchet de composition et d'âge donné, soumis au chargement induit par les couches sus-jacentes (Figure 18).

En dépit de sa faible utilisation par les exploitants, l'instrumentation interne permet notamment :

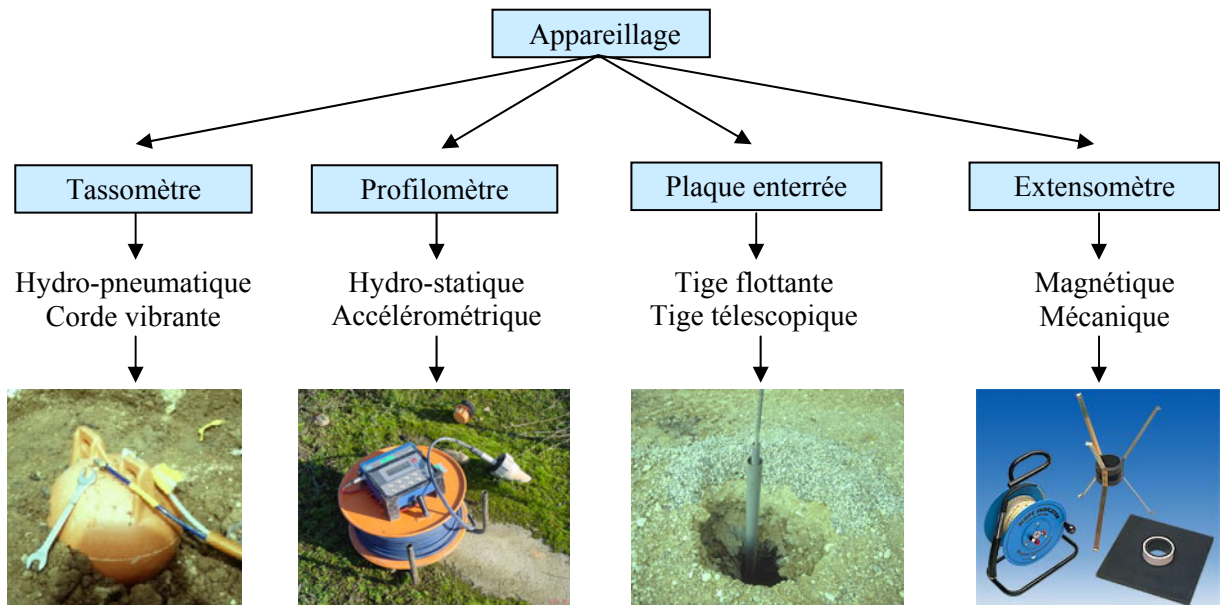
- d'évaluer le tassement primaire des déchets (fonction de la charge) au cours de la phase d'exploitation (correspondant au remplissage en déchet) ;
- de suivre l'évolution de la stabilisation mécanique de couches de déchet localisées à des profondeurs variables ;

- de mesurer le tassement d'anciens déchets dans le cas d'une reprise d'exploitation et dans le cas du 'piggy-backing' d'estimer les mouvements de la barrière de fond du nouveau casier.



**Figure 18.** Schéma d'instrumentation des tassements à l'aide de dispositifs externes et internes.

L'instrumentation interne apporte en conséquence des informations tant pratiques que théoriques, inaccessibles par le biais de mesures de surface. On distingue une dizaine d'appareillages de mesure regroupés en quatre familles distinctes (Figure 19).



**Figure 19.** Illustration des 4 familles d'instrumentation interne des tassements et principe physique de la mesure.

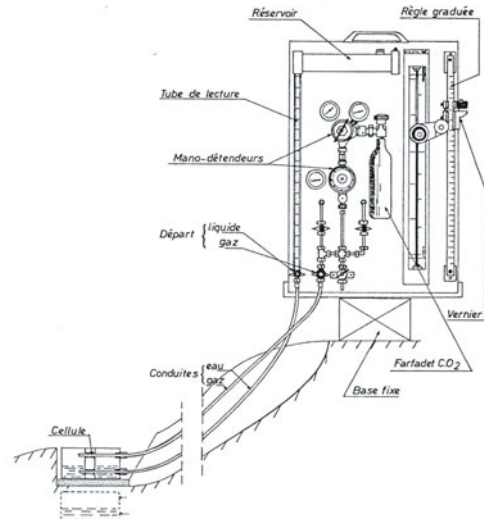
### ➤ Tassomètre

Généralement de forme sphérique (flotteurs), les tassomètres permettent de mesurer les déplacements verticaux au cœur des déchets. Dans le cas des appareillages hydro-pneumatiques courants, les cellules (remplies pour moitié d'eau) sont reliées à un tableau de mesure de préférence fixe par l'intermédiaire de deux tubulures (Figure 20).

L'ensemble fonctionne sur le principe du tube en U. Une contre pression de gaz est appliquée au-dessus du liquide de manière à le refouler dans le tube de mesure du tableau. Pour chacune des mesures, on applique la même pression sur le fluide. Le volume d'eau étant constant, le déplacement vertical de la cellule (équivalent au tassement du déchet) correspond à une translation vers le bas de la colonne d'eau. La précision de mesure reste somme toute modeste :  $\pm 1$  à  $2$  cm.

Le fonctionnement et la durée de vie des tassomètres dépendent largement de la mise en œuvre du dispositif. En particulier, il faut veiller à bien respecter les consignes d'installation suivantes :

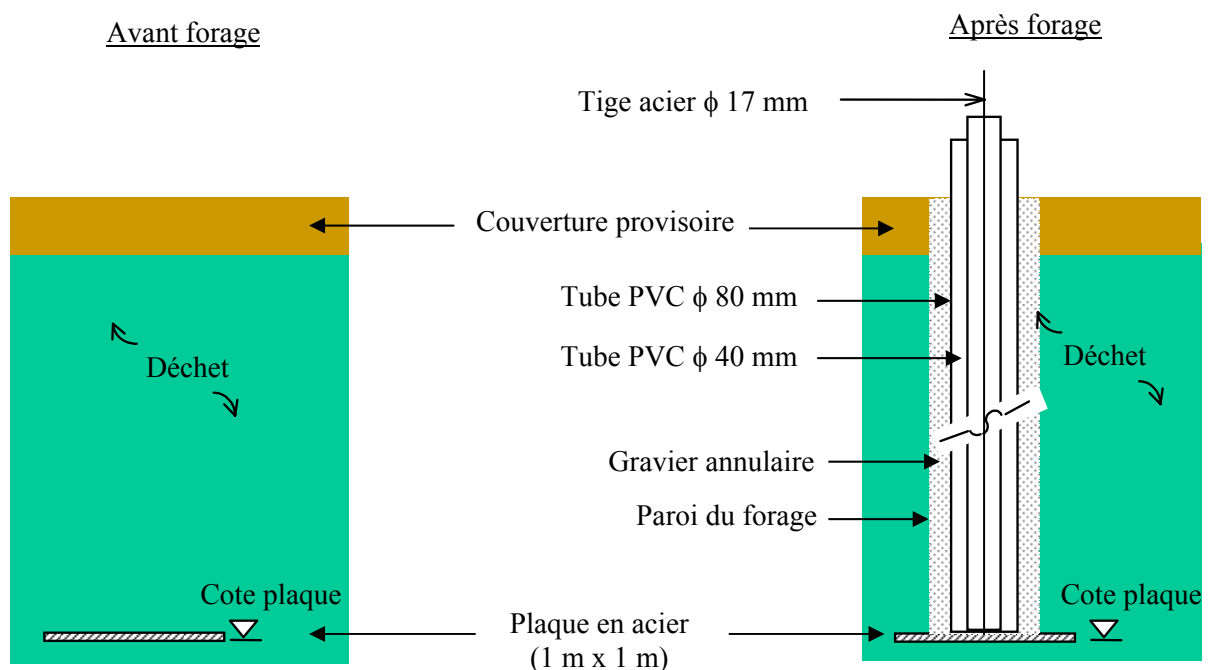
- cellules sphériques calées à l'aide de tiges métalliques pour éviter leur basculement ;
- tableau de mesure < 80 m des tassomètres (risque de pertes de charge hydraulique) ;
- cellules remplies à l'aide d'un fluide anti-fongique / anti-bactérien (risque de colmatage).



**Figure 20.** Tassomètre LCPC (a) Mesure sur le CSD de Torcy (b) Schéma de l'appareillage complet (Filliat, 1981).

➤ **Plaque enterrée et tiges flottantes**

Des plaques de section carrée ( $l \cong 1$  m) sont enterrées à un ou plusieurs niveaux intermédiaires au cours du remplissage d'un casier, minutieusement repérées par nivellement (x, y, z) avant que l'exploitation ne se poursuive normalement jusqu'à la cote finale d'exploitation. Les plaques sont retrouvées alors par forage à la tarière.



**Figure 21.** Schéma de principe des plaques enterrées et tiges flottantes (CSD de Chatuzange)

Grâce à la cohésion du déchet qui garantit la tenue du forage, un tube PVC grand diamètre peut généralement être disposé à la verticale de la plaque, maintenu en position par l'introduction de gravier (à la pelle mécanique) dans l'espace annulaire. Un second tube de plus petit diamètre est glissé dans un second temps à l'intérieur du premier ainsi qu'une tige flottante débouchant à la surface (Figures 21 et 22).

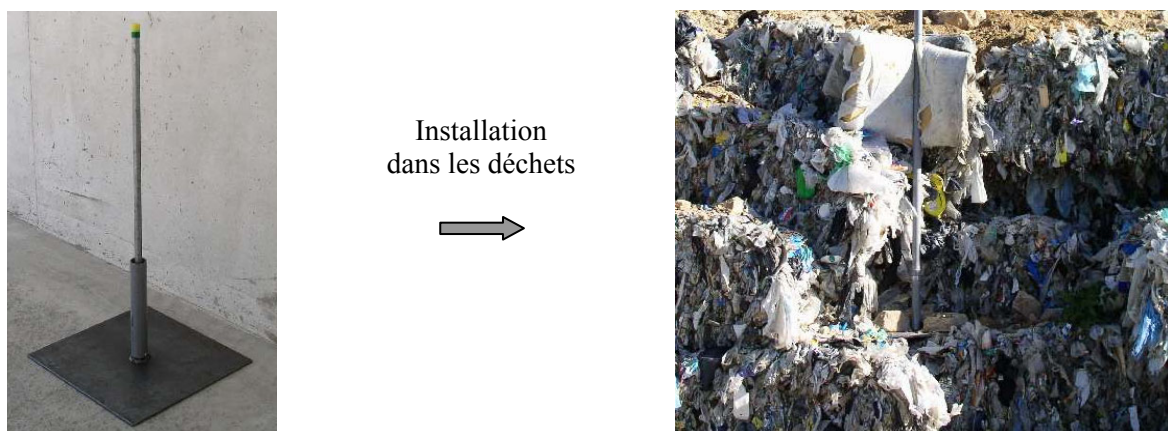


**Figure 22.** (a) Mise en place du gravier annulaire immédiatement après forage (b) Zoom sur le trou de forage après installation du tubage PVC et du train de tige flottante (CSD de Chatuzange).

Le frottement négatif avec le gravier étant entièrement repris par le tubage de grand diamètre, le tube de petit diamètre et la tige sont libres de suivre le déplacement vertical de la plaque au cours du temps. Lorsque l'on fore jusqu'à la plaque, on obtient le tassement des déchets sous-jacents avant forage (fonction notamment du chargement). Ensuite, on est en mesure de suivre le tassement secondaire de la plaque (à charge constante) avec une précision voisine de  $\pm 5$  mm. Notons toutefois que la mise en place de plaques enterrées à des profondeurs supérieures à 10 à 15 m requiert la mise en place de tubages métalliques compte tenu des risques de flexion et/ou flambage de ces derniers.

### ➤ Plaque enterrée et tiges télescopiques

Ce dispositif sensiblement différent du précédent comprend une série de plaques métalliques couplées à un train de tiges vissées. Les plaques métalliques sont placées à différents niveaux en cours de remplissage. Une première tige filetée est fixée à la plaque par l'intermédiaire d'un mamelon soudé, auquel est par ailleurs fixé un tubage PVC protégeant la tige des pressions latérales induites par le déchet (Figure 23 (a)).



**Figure 23.** Plaques enterrées et tiges télescopiques (a) Plaque et tige soudée avant installation sur site (b) Dispositif en place dans des déchets en balle (CSD de Mende).

Au fur et à mesure de la montée du massif, des sections additionnelles de 1 à 3 m (suivant rythme d'exploitation) sont ajoutées jusqu'à atteindre la hauteur finale d'exploitation (Figure 23 (b)). La mise en place 'en continu' peut être confiée au personnel du site moyennant une sensibilisation préalable par l'intermédiaire du responsable d'exploitation. En effet, la mise en place et le compactage du déchet autour des tiges exige une vigilance accrue de la part des conducteurs d'engins pour éviter de fléchir les tiges à l'occasion du remplissage ou de l'entretien du casier. L'installation de ce dispositif est déconseillée à des profondeurs > 15 m ainsi qu'au voisinage des talus en raison des possibles déplacements latéraux du massif de déchet.

Le repérage topographique des tiges fournit le tassement des couches de déchet reposant sous les plaques. Moyennant une série de plaques installées à différentes profondeurs, il est possible de suivre le tassement des déchets couche par couche et ainsi de caractériser la compression de déchets d'âge différent – l'exploitation d'un casier pouvant parfois durer jusqu'à 2 à 3 ans.

### ➤ **Extensomètre magnétique de forage**

L'extensomètre magnétique (encore appelé tassomètre à induction magnétique) permet de mesurer les déplacements internes des déchets au voisinage d'un forage. Des anneaux magnétiques sont positionnés (sans serrage) autour du tubage vertical, libres de glisser le long de ce dernier en accompagnant les tassements des déchets. Les mesures sont réalisées à l'aide d'une sonde à interrupteur fixée à l'extrémité d'un ruban gradué déplacé du fond vers le haut du tube. Au niveau d'un anneau aimanté, deux signaux sonores sont émis et la hauteur correspondante est lue sur le ruban gradué (précision :  $\pm 3$  à 5 mm). Celle-ci peut être convertie en valeur absolue (cote NGF) moyennant le nivellement du col du forage par topographie classique.

Notons en préambule que cette technique peut être sujette à des perturbations en présence de constituants métalliques à forte concentration dans le déchet. Le risque est toutefois limité car seule la présence continue d'éléments ferreux sur le pourtour proche du tubage est susceptible de créer un champ magnétique pouvant occasionner un faux signal de mesure.

Il existe sur le marché trois modèles d'extensomètres de ce type. L'**extensomètre à plaques** comporte un ensemble de plaques PVC percées à l'intérieur desquelles sont incorporés des aimants (Figure 24 (a) et (b)). Ces plaques sont disposées le long du tube télescopique, les portions de tube étant emboîtées progressivement au cours de l'exploitation de manière analogue aux plaques et tiges télescopiques.



**Figure 24.** Extensomètre magnétique (a) Gros plan sur la plaque aimantée et le tube télescopique avant installation (b) Mesure au moyen de la sonde électromagnétique (CSD de Mende).



L'**extensomètre à ressorts à lame** comprend une série de ressorts aimantés (initialement repliés) positionnés à différentes profondeurs le long d'un double train de tiges métalliques installé en fin d'exploitation. Le déploiement des ressorts (ou griffes) est actionné après installation par simple traction d'un fil de tire externe ou d'un dispositif coupant introduit à l'intérieur du tube d'accès. La tige extérieure fait alors office de réducteur de frottements, assurant le libre coulisement de la tige intérieure qu'il convient de relever régulièrement par nivellement de surface. En cas de poursuite d'exploitation, des tiges supplémentaires peuvent éventuellement être ajoutées au fur et à mesure de la montée (sur le modèle des tiges télescopiques). En comparaison du dispositif précédent, l'extensomètre à ressorts est plus facile à mettre en œuvre. En revanche, l'accrochage latéral des ressorts peut s'avérer difficile en cas de contact imparfait entre le tubage et le déchet environnant.

L'**extensomètre 'Sondex'** consiste enfin en une série d'anneaux cylindriques aimantés pré-intercalés le long d'une gaine PVC ondulée souple, rigidifiée à l'intérieur par un tube inclinométrique classique. L'espace entourant la gaine est comblé à l'aide d'un mortier (initialement liquide) qui la rend solidaire du déchet. Sous réserve de l'absence de frottements importants avec l'inclinomètre (par flexion ou flambage), la gaine PVC coulisse librement le long du tube sous l'effet des déplacements verticaux du massif de déchet, ce qui permet indirectement leur évaluation.

#### ➤ **Bilan des instrumentations internes**

Les avantages et les inconvénients des différents dispositifs internes sont regroupés dans le Tableau 2. Les principaux CSD ayant fait l'objet d'une instrumentation sont répertoriés pour chaque appareillage.

**Tableau 2.** Avantages et inconvénients des dispositifs de suivi interne des tassements

Appareillage	Sites	Avantages	Inconvénients
Tassomètre	Montreuil Torcy CSD UK	- Pas de gêne en cours d'exploitation - Instrumentation possible au voisinage des talus	- Précision de mesure et performance médiocres à long terme - Mise en place et suivi assez onéreux
Profilomètre interne	Montech Lapouyade CSD USA	- Profils de mesure continus - Pas de gêne en cours d'exploitation	- Mise en place conditionnée par la présence d'un accès latéral - Mise en place et suivi assez onéreux
Plaque et tige flottante	Chatuzange CSD Grèce et Australie	- Mesure du tassement primaire après la fin d'exploitation - Pas de gêne en cours d'exploitation	- Forages soignés requis avant début du suivi (pour l'installation des tiges)
Plaque et tige télescopique	Chatuzange CSD USA et Canada	- Mesures au cours du chargement - Bon rapport qualité / prix	- Gêne occasionnée pour les engins de compactage et de maintenance - Risque de flexion du tubage vertical
Extensomètre de forage	Mende CSD Brésil, UK et USA	- Mesure de tassement par couche - Installation au choix pendant ou après exploitation	- Dispositif à proscrire en présence de déchets métalliques - Risque de flexion du tubage vertical

## 2.4. Organisation pratique des campagnes topographiques

#### ➤ **Suivi topographique de surface (initié en phase de post-exploitation)**

Il est nécessaire que l'exploitant planifie son suivi topographique avec :

- une borne fixe en x, y et z servant de référence (absolue) à la topographie du site ;
- une série de stations intermédiaires (de préférence identiques à chaque levé) permettant au géomètre de relier ses mesures (relatives) à sa borne de référence partout sur le site ;

- un ensemble de repères matérialisés (sauf suivi laser, photogrammétrie et GPS) installés le plus rapidement possible après la pose de la couverture et aussitôt nivelés (détermination des cotes de référence  $z_0$ ) ;
- un calendrier de mesures à réaliser sans modification du maillage  $(x, y)$  au cours de la durée complète du suivi topographique.

Le nombre de repères topographiques dépendra notamment de la réutilisation ultérieure du site. Si une requalification est envisagée (aire de jeu, parking, ouvrage routier, etc.), un maillage plus serré sera sélectionné. Du choix de l'implantation des repères topographiques dépend largement les tassements observés : le maillage  $(x, y)$  des points topographiques doit par conséquent être prédéfini rigoureusement, comprenant les zones les plus vulnérables (très sensibles aux tassements différentiels) à proximité des puits verticaux, des digues inter-alvéoles ou encore des talus. Le maillage restera identique ou sera complété en cas d'apparition de points singuliers au cours du temps (cuvettes, inversions de pente, etc.).

Le suivi des tassements de la couverture doit par ailleurs être effectué selon une périodicité initialement élevée (bimensuelle à trimestrielle) pouvant à terme devenir semestrielle (conseillé) voire annuelle. Cette périodicité peut être reconsidérée si des désordres sont observés ou en cas d'événement climatique susceptible d'entraîner des conséquences pour le déchet. Un programme de levés fréquents offre par ailleurs l'opportunité de corrélérer les tassements à d'autres indicateurs de la biodégradation (la production de biogaz notamment) et ainsi de mieux comprendre les phénomènes en jeu. Enfin, il est souhaitable de prolonger les campagnes topographiques sur repères fixes dans la durée (au minimum 5 ans, idéalement pendant la totalité de la période de surveillance du casier considéré).

Considérant un site de stockage en début d'exploitation, les campagnes topographiques seront de préférence initiées dès la fin du remplissage de la première alvéole. Ainsi, en supposant que les caractéristiques du déchet et de sa mise en œuvre sont conservées pour les alvéoles suivantes, une prédiction des tassements relatifs à ces dernières alvéoles sera possible (par extrapolation au moyen de la méthode proposée au § 3.3), permettant d'estimer leur capacité de stockage et d'anticiper sur le phasage d'exploitation.

#### ➤ **Suivi topographique interne (initié en phase d'exploitation)**

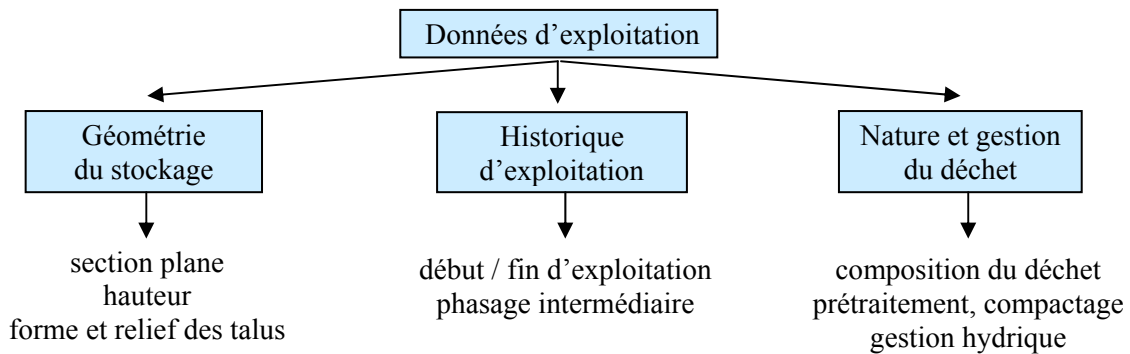
Les suivis internes requièrent la mise en place d'une instrumentation qui peut intervenir :

- en cours d'exploitation (tassomètres, profilomètres, plaques et tiges télescopiques, extensomètres à plaques) ;
- pour partie en cours et en fin d'exploitation (plaques et tiges flottantes) ;
- en fin d'exploitation (extensomètres).

S'agissant des dispositifs mis en place en cours d'exploitation, les mesures pourront débiter pendant la période de remplissage du casier de déchet : la fréquence du suivi dépendra essentiellement du nombre de couches rajoutées et du type d'information recherché.

#### ➤ **Collection et archivage des données**

Après traitement au moyen d'un tableur informatique, les données topographiques peuvent éventuellement être archivées dans un Système d'Information Géographique (S.I.G.) attaché au site. L'exploitation des données (et leur extrapolation à d'autres alvéoles) passe par ailleurs par une codification de la saisie et une information complète sur le déchet, la géométrie du stockage et son historique d'exploitation (Figure 25). A titre d'exemple, un questionnaire type rédigé en vue de l'application du modèle ISPM (§ 3.3) est joint en Annexe 1.



**Figure 25.** Principales données d'exploitation nécessitant un archivage par les exploitants.

## 2.5. Estimation de la densité des déchets

Il est possible de déterminer la densité des déchets suivant deux approches :

- par mesure ponctuelle : on accède alors à une valeur de densité ayant une signification physique (densité localisée dans l'espace) ;
- par calcul à partir des données d'exploitation : on accède alors à une valeur de densité moyenne à l'échelle d'une alvéole de stockage.

### ➤ Evaluation de la densité des déchets par mesure ponctuelle (sur échantillons)

Différentes techniques de mesure de la densité des déchets en place ont été proposées que l'on peut diviser schématiquement en deux catégories :

- mesures destructives (excavations à la pelle mécanique, sondages carottés) ;
- mesures non destructives (diagraphies gamma et à neutrons).

A ce jour, seules les mesures destructrices garantissent toutefois une facilité d'exécution suffisante dans la perspective d'une application par les exploitants :

- Excavations à la pelle mécanique

Cette méthode de mesure consiste à excaver des puits de forme sensiblement parallélépipédiques (avec contours les plus nets possible) au moyen d'une pelle mécanique (Figure 26 (a)). Les déchets extraits sont ensuite pesés (sur pont - bascule) et le volume de la cavité est déterminé en remplissant celle-ci d'eau (à l'aide d'une citerne), les parois et le fond ayant au préalable été recouverts par une membrane souple et étanche (Figure 26 (b)).



**Figure 26.** Mesure de densité des déchets de surface (a) Excavation à la pelle (CSD de Saint-Paul de Tartas) (b) Remplissage du puit excavé et étanché à l'aide d'une citerne d'eau (CSD de Mende)

La quantité d'eau déversée est mesurée soit par pesée de la citerne, soit à l'aide d'un compteur. L'excavation doit représenter de préférence un volume supérieur à 2 m<sup>3</sup>, permettant au passage le prélèvement d'échantillons > 500 kg (Modecom, 1993) en vue d'un tri. Cette méthode est simple et rapide à mettre en œuvre (3 à 4 mesures par jour en moyenne) et est caractérisée par une erreur relative généralement inférieure à 15 %. Elle présente en revanche l'inconvénient de ne concerner que les déchets de sub-surface récents et peu dégradés et ne fournit par conséquent que la densité initiale des déchets (après compactage). La présence d'éléments grossiers (encombrants notamment) doit être soigneusement notée car elle permet d'expliquer certains écarts de densité entre puits. Notons qu'un protocole détaillé a été mis au point par Simecsol (1996).

• Sondages carottés

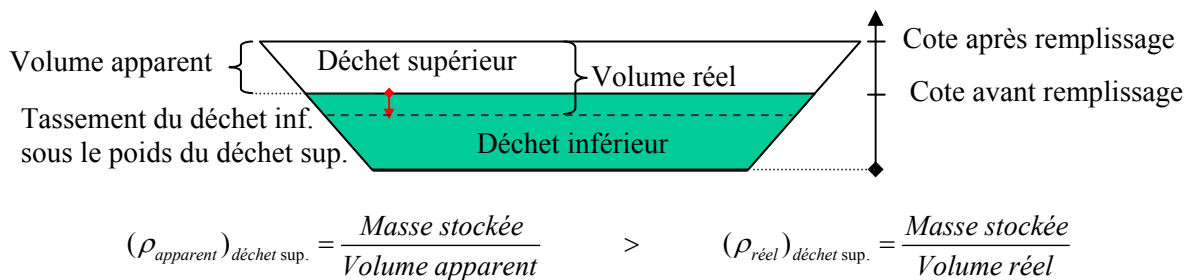
L'excavation est effectuée à sec au moyen d'une sondeuse équipée d'un carottier simple ( $\phi_{int} > 100$  mm) doté de couronnes très dures (carbure de tungstène ou diamant). Chaque passe est pesée tandis que le volume correspondant est déterminé sur la base du diamètre de la carotte et de la longueur de la passe, en général inférieure à 1,3 m. En présence d'horizons terreux (couverture provisoire non décapée), l'opérateur peut décider de ne pas les prendre en compte dans son calcul de densité. L'inconvénient de cette méthode tient au risque de surévaluation de la densité du déchet compte tenu de son remaniement au voisinage du forage (enchevêtrement de ses éléments constitutifs).

**Tableau 3.** Avantages et inconvénients des techniques d'évaluation de la densité des déchets.

Méthode de mesure	Avantages	Inconvénients
Excavation à la pelle	- Fiabilité (incertitude $\cong 10$ %) - Rapidité (4 à 6 puits / jour) - Coût	- Mesure exclusivement en surface : pas d'appréciation de la densité en profondeur
Sondage carotté	- Mesure possible à toute profondeur - Observation visuelle du carottage	- Forage de petit diamètre / déchet - Durée de l'essai (1 sondage / jour) - Coût

➤ **Evaluation de la densité moyenne des déchets par calcul (à l'échelle d'une alvéole)**

La densité moyenne d'un déchet peut être estimée à l'issue de l'exploitation d'une alvéole de stockage en rapportant le tonnage des déchets stockés au volume remblayé correspondant (cubature effectuée par le géomètre). Avec le développement des techniques de mesure embarquées (stations totales, GPS, scanner laser 3D), ce mode d'estimation gagne en précision. En supposant un nivellement effectué à un certain niveau et à un second niveau supérieur, la masse de déchet rajoutée correspond à la différence de niveau mesurée augmentée du tassement des couches inférieures sous l'effet des surcharges et du temps (Figure 27). Il convient par conséquent de rester vigilant en évitant notamment d'assimiler la densité ainsi calculée à une densité de compactage : la surestimation est d'autant plus grande que le massif de déchet considéré est élevé et sa durée d'exploitation importante.



**Figure 27.** Illustration de l'erreur engendrée lors de l'estimation de la masse volumique (ou densité) des déchets rajoutés à partir de la masse stockée et du volume comblé.

## 2.6. Synthèse des essais de reconnaissance dans les déchets

Une connaissance minimale du déchet est essentielle pour apprécier son comportement mécanique. Parmi les caractéristiques qu'il est possible de déterminer sur site ou encore en laboratoire (Tableau 4), on peut citer notamment :

- la **masse volumique**  $\rho$  (ou la densité équivalente) : cette caractéristique physique est nécessaire à la détermination des contraintes qui s'exercent au cœur, en fond et sur les flancs du massif de déchet (§ 1.6 et 2.5) ;
- la **cohésion** et l'**angle de frottement interne** ( $c$  et  $\phi$ ) : ces deux paramètres traduisent l'aptitude du déchet à 'résister' au cisaillement. La cohésion représente les forces de contact et d'enchevêtrement entre les constituants du matériau. L'angle  $\phi$  représente le frottement moyen entre les éléments du déchet lorsque celui-ci est soumis à des déformations internes ;
- le coefficient de **perméabilité (K)** : encore appelé conductivité hydraulique, ce paramètre permet d'évaluer le potentiel d'écoulement gravitaire des lixiviats au sein des déchets. En deçà d'un seuil compris grossièrement entre  $10^{-6}$  et  $10^{-8}$  m/s, des surpressions peuvent apparaître, potentiellement préjudiciables pour la biodégradation (diffusion fluide bloquée) comme pour la stabilité mécanique du matériau stocké (notamment au voisinage des talus).

**Tableau 4.** Liste des principaux essais de reconnaissance dans les déchets

Caractérisation	Paramètre recherché	Type d'essai	Mode de mesure
➤ Physique	- Composition	tri manuel	essai sur échantillon
	- Température	thermocouples	mesure en continu
	- Matière organique	protocoles multiples	essai de laboratoire
	- Teneur en eau massique	mise à l'étuve (60°C - 72 h)	essai de laboratoire
➤ Mécanique des petites déformations	- Masse volumique ( $\rho$ )	essai à la pelle / forage	essai sur échantillon
	- Contraintes internes ( $\sigma$ )	jauge à coussin hydraulique	mesure en continu
	- Poussée des terres ( $K_0$ )	idem	mesure en continu
	- Module d'élasticité (E)	pressiomètre	essai à la tarière
	- Coeff. de Poisson ( $\nu$ )	idem	essai à la tarière
	- Module de réaction ( $K_s$ )	essai à la plaque	essai de surface
➤ Mécanique à la rupture	- Cohésion ( $c$ )	essai de cisaillement	essai sur échantillon
	- Angle de frottement interne ( $\phi$ )	idem	compacté
	- Résistance de pointe ( $q_c$ )	pénétromètre statique	essai destructif
	- Frottement latéral ( $f_s$ )	idem	essai destructif
	- Nombre de coups (N)	pénétromètre dynamique	essai destructif
➤ Hydraulique	- Niveau statique (H)	observation	puits de contrôle
	- Porosité efficace ( $n_e$ )	immersion / vidange	puits de contrôle
	- Perméabilité (K)	écoulement saturé	puits d'essai
➤ Géophysique	- Résistivité électrique ( $\rho$ )	tomographie électrique	électrodes de surface
	- Conductivité électrique ( $1/\rho$ )	essai électromagnétique	mesure aérienne
	- Vitesse de cisaillement ( $V_s$ )	sismique-réfraction	géophones de surface
	- Paramètres E, $\nu$ , $V_s$	essai 'cross-hole'	géophones internes

Quelques observations méritent d'être apportées à propos des essais présentés dans le Tableau 4 :

- les jauges à coussin hydraulique requièrent des conditions d'installation très précises difficiles à satisfaire dans la pratique ;
- l'utilisation des essais pressiométriques et pénétrométriques dans les déchets est controversée au sein de la communauté scientifique en raison de la taille de la sonde relativement à la taille des éléments constitutifs de ce dernier ;
- les essais à la plaque fournissent un indicateur du niveau de compactage ;

- l'interprétation des essais de résistivité électrique demeure délicate compte tenu que cette grandeur physique est fonction à la fois de la porosité du déchet, de sa température interne, de sa teneur en eau et de la concentration du lixiviat en ions libres.

### 3. Prédiction des tassements des déchets

#### 3.1. Prédiction des tassements des déchets : adapter la démarche à l'objectif

La prédiction des tassements a en premier lieu un objectif sécuritaire. Dans le contexte actuel de pénurie de sites de stockage de déchets, la prédiction des tassements se justifie aussi par une **démarche opérationnelle**. Les principaux paramètres qui régissent l'exploitation d'un casier de stockage sont :

- la durée d'exploitation ;
- la hauteur d'exploitation autorisée fonction de la cote de fond de casier et de la cote supérieure autorisée ;
- le flux de déchets entrants (équivalent à un tonnage quotidien ou mensuel).

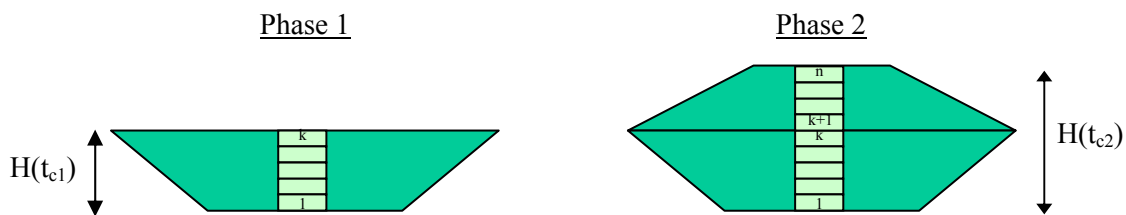
En règle générale, l'arrêté préfectoral d'autorisation d'exploiter stipule à la fois la durée d'exploitation du casier considéré et sa cote supérieure autorisée (généralement avant ou immédiatement après la pose de la couverture). La prédiction des tassements au stade de l'avant-projet permet d'évaluer la capacité de stockage du casier en fonction des flux de déchets entrants.

Dans d'autres cas, la prédiction des tassements peut constituer par ailleurs un outil permettant :

- à partir de la hauteur d'exploitation autorisée et des flux de déchets entrants d'estimer au mieux la durée d'exploitation effective ;
- à partir de la durée d'exploitation et des flux de déchets entrants d'estimer au mieux la hauteur de déchet effective en fin d'exploitation.

A titre d'exemple, la démarche précédente peut conduire à envisager l'exploitation d'un casier en 2 phases (ou plus) séparées par un temps d'arrêt (Figure 28) profitant ainsi du vide de fouille libéré par les tassements :

- Phase 1 : mise en place de la colonne de déchet inférieure (couches de déchet 1 à k) ;
- Phase 2 : mise en place de la colonne de déchet supérieure (couches k+1 à n).



**Figure 28.** Schéma d'exploitation en 2 phases séparées par un temps de repos

En phase de post-exploitation enfin, la prédiction des tassements – doublée d'une évaluation des tassements différentiels (§ 5) – permet de prévoir l'amplitude des déformations que le complexe de couverture devra supporter.

#### 3.2. Historique de la modélisation des tassements

Face au souhait des exploitants de disposer d'outils de prédiction pertinents, des modèles ont été développés à partir des années 1960. On peut les répartir schématiquement en trois catégories, à savoir :

- les modèles biochimiques ;
- les modèles mixtes bio-mécaniques ;
- les modèles tirés de la mécanique des sols.

En dépit de leur intérêt théorique indéniable, les modèles biochimiques et mixtes ne sont pas parvenus jusqu'à présent à constituer des outils de prédiction efficaces, soit parce qu'ils représentent mal les mécanismes en jeu, soit parce que leur calibration présente un caractère trop complexe ou aléatoire. Pour ces raisons, les **modèles issus de la mécanique des sols** représentent à ce jour les seuls outils réellement utilisables par les exploitants et les bureaux d'étude. Remarquons au passage qu'un modèle sera d'autant plus facilement utilisable qu'il sera basé sur des paramètres aisément quantifiables et en nombre limité.

Une étude exhaustive des modèles proposés dans la littérature a été réalisée par Olivier (2003). Ces modèles ont pour point commun de représenter la masse de déchet sous la forme d'une colonne multi-métrique d'âge constant. On retiendra qu'ils sont exprimés à partir de lois de type **exponentielle** [Gibson et Lo (1961), Asaoka (1978), Gandolla et al. (1992)], **logarithmique** [Sowers (1973), Yen et Scanlon (1975), Bjarngard et Edgers (1990)], **puissance** (Edil et al., 1990) ou encore **hyperbolique** (Ling et al., 1998).

Parmi les modèles précédents, le **modèle de Sowers (1973)** a hérité d'une large diffusion au sein des bureaux d'études spécialisés de par sa facilité d'utilisation. En dépit d'une formulation simple à partir de paramètres en nombre réduit, ce modèle n'en demeure pas moins délicat à appliquer par suite de l'incertitude sur ses coefficients de compression (influencés par l'historique du stockage) et de l'absence de standardisation de ses paramètres de temps, ces deux points excluant sa diffusion sous la forme d'abaques.

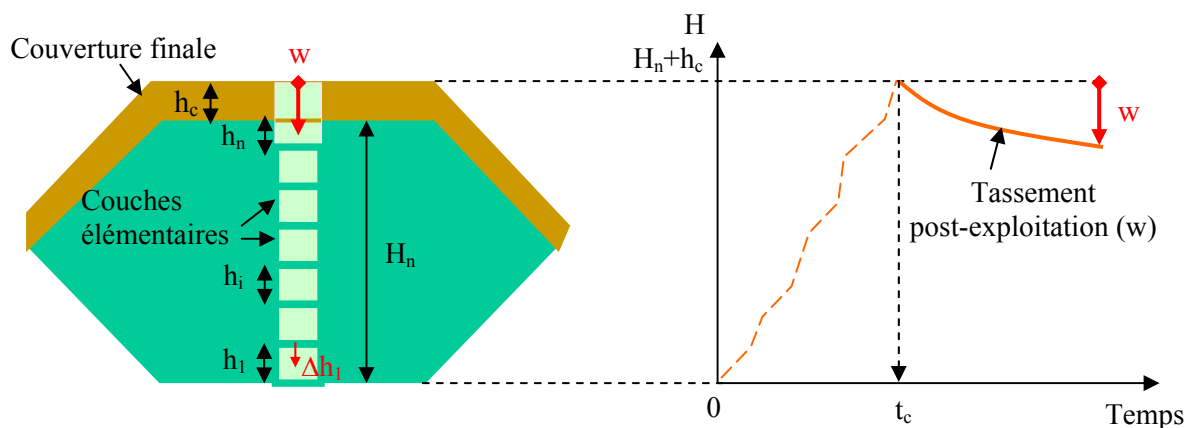
A propos des modèles d'Asaoka (1978) et de Ling et al. (1998), retenons qu'ils présentent l'avantage de pouvoir être appliqués à des sites 'orphelins' de hauteur et / ou d'historique méconnus par simple résolution graphique à partir de mesures de calibration (Annexe 2). Compte tenu de leur forte imprécision, il est toutefois conseillé de ne les utiliser qu'à titre indicatif.

### 3.3. Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements (modèle ISPM)

#### 3.3.1. Présentation du modèle ISPM

L'évaluation quantitative de l'influence des différentes composantes du tassement est complexe. Un aspect qui complique considérablement l'estimation est le fait que la masse de déchet n'est pas stockée en une fois mais en couches successives. A l'opposé des modèles précédents (§ 3.2.), une représentation rigoureuse des tassements sur un casier s'attacherait à prendre en compte l'historique de remplissage du casier (niveaux de remplissage intermédiaire, repos d'exploitation avant rechargement) et à additionner les tassements de chaque couche élémentaire de déchet.

De ce constat découle la représentation d'une colonne de déchet comme un **empilement de couches élémentaires** (Figure 29), chacune caractérisée par sa propre histoire. Cette approche s'est concrétisée par le développement du 'Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements' (encore appelé modèle ISPM d'après l'acronyme anglais) [Thomas (2000), Olivier (2003)] dont l'application 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).



**Figure 29.** Modélisation de l'exploitation sous la forme d'un empilement de couches élémentaires de déchet (modèle ISPM)

➤ **Compression (oedométrique) d'une couche élémentaire de déchets**

Tel que décrit précédemment (§ 1.5.), le tassement d'une couche de déchet est représenté suivant une composante primaire (à court terme) résultant du chargement du déchet et une composante secondaire (à long terme) résultant essentiellement de la dégradation de la matière organique, de la réorganisation et du tamisage des constituants du déchet et des interactions associées. La conduite de tests de compression en maxi-cellule de laboratoire (1 m<sup>3</sup>) sur divers échantillons représentatifs de déchets ménagers (Olivier, 2003) a mis en évidence que ces 2 composantes de tassement pouvaient être représentées à partir de lois logarithmiques fonction respectivement de la charge et du temps.

Considérant une couche élémentaire de déchet d'indice  $i$ , d'épaisseur initiale  $h_0$  immédiatement après compactage, le tassement primaire  $\Delta h_i^p$  relatif à cette couche est supposé instantané lorsqu'une surcharge  $\sigma_i$  est appliquée et est décrit par analogie avec la théorie de Terzaghi (1943) par :

$$[1] \quad \frac{\Delta h_i^p}{h_0} = 0 \text{ en conditions surconsolidées } (\sigma_i \leq \sigma_c)$$

$$[2] \quad \frac{\Delta h_i^p}{h_0} = C_R^* \cdot \log \frac{\sigma_i}{\sigma_c} \text{ en conditions normalement consolidées } (\sigma_i > \sigma_c)$$

où  $C_R^*$  représente le coefficient de compression primaire 'intrinsèque' du déchet,  $\sigma_c$  (kPa) la charge de préconsolidation résultant du compactage et  $\sigma_i$  (kPa) la surcharge appliquée au sommet de la couche  $i$ , résultant du poids des couches de déchet sus-jacentes et éventuellement de la couverture finale.

Considérant la même couche élémentaire d'indice  $i$ , le tassement secondaire supposé indépendant de la charge est décrit par analogie avec la loi de Buisman (1936) par :

$$[3] \quad \frac{\Delta h_i^s}{h_0} = C_{ae}^* \cdot \log \frac{\tau}{\tau_i}$$

où  $C_{ae}^*$  représente le coefficient de compression secondaire 'intrinsèque' du déchet,  $\tau_i$  le temps de construction de la couche  $i$  et  $\tau$  le temps pris depuis le début de la construction de la couche  $i$ .



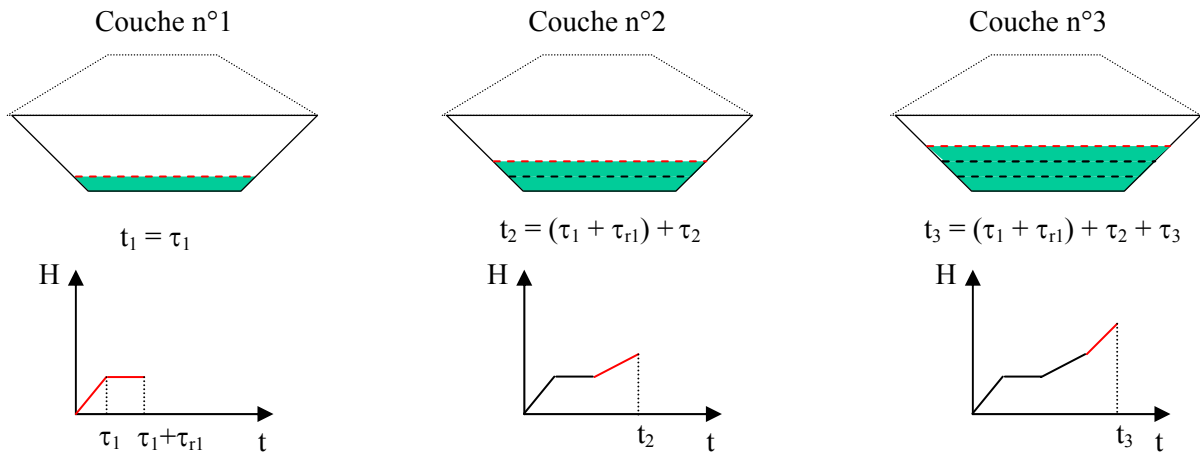
➤ **Compression (oedométrique) d'une colonne de déchet**

A l'échelle d'une colonne de déchet, le tassement primaire de la couche  $i$  débute dès que la contrainte  $\sigma_i$  appliquée au sommet de la couche  $i$  devient supérieure à la contrainte de préconsolidation  $\sigma_c$ . Quant au tassement secondaire (supposé indépendant du tassement primaire), il est supposé démarrer à l'issue de la mise en place de la couche  $i$  considérée, autrement dit au temps  $t_i$ , temps 'absolu' depuis le début d'exploitation (Figure 30).

$$[4] \quad t_i = \sum_{j=1}^i \tau_j + \sum_{j=1}^{i-1} \tau_{rj}$$

où  $\tau_j$  représente le temps de construction de la couche  $j$  et  $\tau_{rj}$  le temps d'arrêt d'exploitation éventuel entre la couche  $j$  et la couche  $j + 1$ . Dans la pratique,  $\tau_{rj}$  sera considéré non nul uniquement dans le cas d'un arrêt d'exploitation significatif ( $> 2$  semaines par exemple).

$t_n$  représente le temps de construction de la colonne complète ( $n$  couches),  $t_c (= t_n + \tau_c)$  inclut par ailleurs le temps de construction ( $\tau_c$ ) de la couverture finale.



**Figure 30.** Simulation de la construction d'une colonne de déchet à l'aide du modèle ISPM (exemple des couches 1 à 3 :  $\tau_{r1} \neq 0$  ;  $\tau_{r2} = \tau_{r3} = 0$ ).

Les composantes primaires ( $\Delta h_i^p$ ) et secondaires ( $\Delta h_i^s$ ) du tassement des  $n$  couches élémentaires sont additionnées pour obtenir le tassement total de la colonne au temps  $t$  :

$$[5] \quad w_n(t) = w_n^p(t) + w_n^s(t)$$

où  $w_n^p(t) = \sum_{i=1}^n \Delta h_i^p(t)$  et  $w_n^s(t) = \sum_{i=1}^n \Delta h_i^s(t)$  (Annexe 3).

Ainsi, le tassement d'une colonne de déchets peut être représenté en 2 phases :

- une première phase coïncidant avec la construction de la colonne ( $t \leq t_c$ ) au cours de laquelle les composantes primaires et secondaires du tassement se superposent  $\Rightarrow w_n(t) = w_n^p(t) + w_n^s(t)$  ;
- une seconde phase dite de 'post-exploitation' ( $t > t_c$ ) à charge constante au cours de laquelle seuls ont lieu des tassements secondaires  $\Rightarrow w_n^p(t) = w_n^p(t_c)$

L'hypothèse de la charge constante se justifie si l'on exclut les variations de masse relatives à la biodégradation et à l'évolution de la teneur eau globale.

➤ **Application pratique du modèle ISPM**

Suivant le niveau d'avancement du projet considéré, on sera intéressé :

- **au stade de l'avant-projet** par la prédiction du tassement total de la colonne de déchets, avec pour objectif l'estimation de la capacité de stockage de l'alvéole et le contrôle effectif du phasage d'exploitation  $\Rightarrow w_n(t) = w_n^p(t) + w_n^s(t)$  ;
- **en phase de post-exploitation** par la prédiction du tassement de surface ( $w$ ) pris à partir de la pose de la couverture, avec pour objectif cette fois l'évaluation du tassement que celle-ci devra supporter  $\Rightarrow w(t) = w_n(t) - w_n(t_c) = w_n^s(t) - w_n^s(t_c)$  puisque le tassement primaire est terminé en fin d'exploitation.

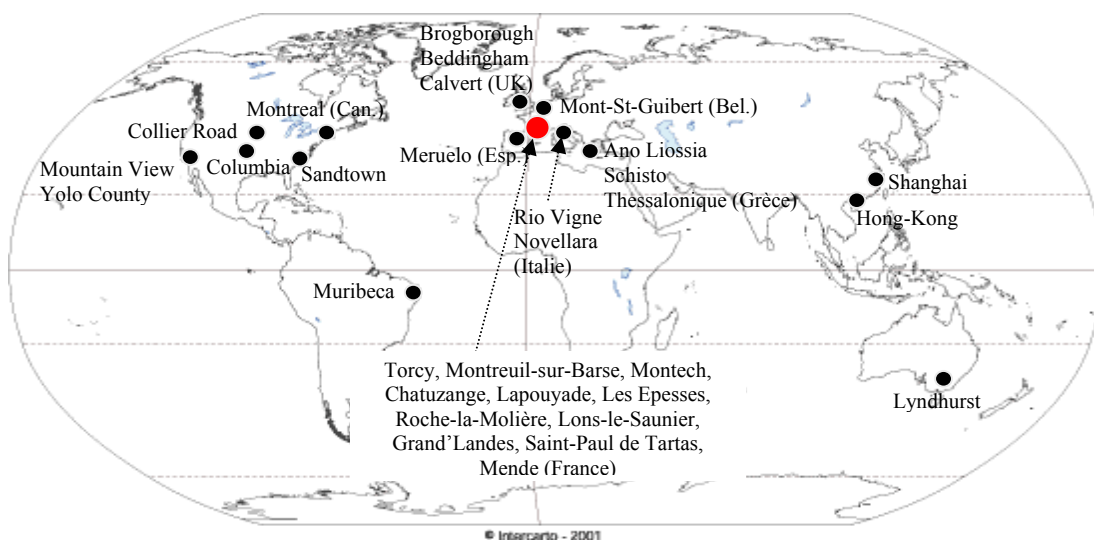
Que l'on se place dans le cas d'une alvéole au stade de l'avant-projet ou en post-exploitation, l'application du modèle ISPM repose en premier lieu sur la détermination du coefficient de compression secondaire  $C_{ac}^*$  qui peut être effectuée suivant l'une des deux approches suivantes :

- par **analyse directe** : sur la base de coefficients de compression pré-calibrés ou supposés (seule approche applicable au stade de l'avant-projet ou au cas de casiers non instrumentés) ;
- par **analyse inverse** : après calibration de  $C_{ac}^*$  à partir d'une campagne topographique d'une année à quelques années (approche privilégiée pour les CSD modernes).

### 3.3.2. Application du modèle ISPM par analyse directe (au stade de l'avant-projet)

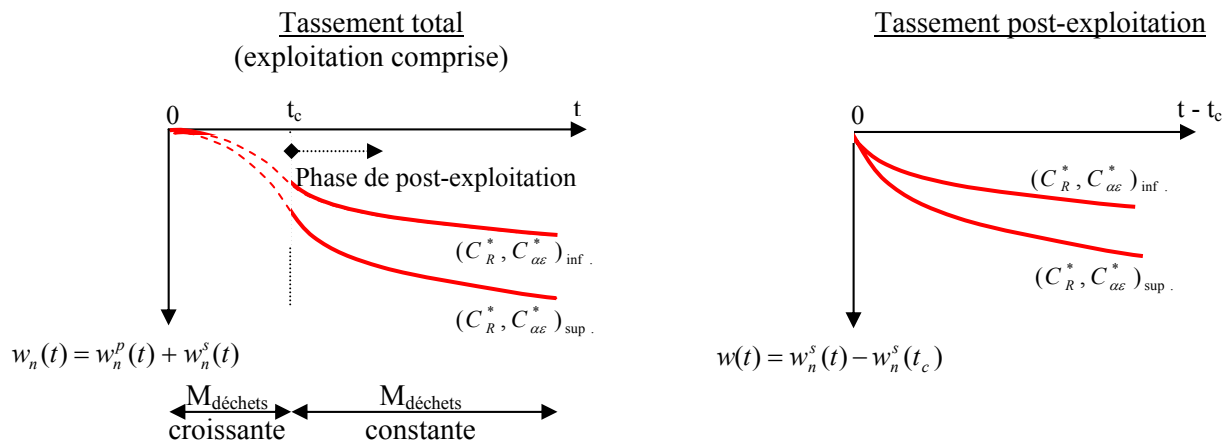
Dans le cas le plus général qui consiste à évaluer les tassements dès le début de construction de la colonne de déchet (Figure 31 (a)), cette méthode repose sur la pré-calibration des coefficients de compression primaire  $C_R^*$  et secondaire  $C_{ac}^*$  à partir d'études de cas analogues. Dans le cadre du programme de recherche ADEME (1996 – 2003) sur les tassements, une dizaine de CSD français ont été instrumentés fournissant les prémises d'une **base de données sur les tassements**.

Il reste que l'influence de certains paramètres relatifs à la nature du déchet, à sa mise en oeuvre ou encore certaines données climatiques n'ont pu être testés à partir des seuls sites implantés en France. Dans un registre différent, les hauteurs de stockage dépassent rarement 30 à 40 m en France mais des stockages sur 40 à 80 m (voire au-delà de 100 m) sont relativement courants de par le monde. Pour toutes ces raisons, un '**Observatoire International des CSD**' unique en son genre a été développé constitué à ce jour d'une trentaine de sites répartis sur 4 continents (Figure 31), qui devrait permettre d'affiner progressivement la détermination des paramètres de compressibilité du déchet.



**Figure 31.** Observatoire international sur les CSD développé à l'Université de Grenoble.

En dépit des progrès très significatifs réalisés, il convient de garder à l'esprit que la sélection forfaitaire des coefficients  $C_R^*$  et  $C_{\alpha\epsilon}^*$  reste sensible. Si les gammes de variation habituelles de ces 2 coefficients sont désormais bien connues ( $0,12 < C_R^* < 0,25$  et  $0,03 < C_{\alpha\epsilon}^* < 0,20$ ), ceux-ci présentent une sensibilité importante (particulièrement  $C_{\alpha\epsilon}^*$ ) aux conditions du site pour pouvoir se permettre de les sélectionner sans référence. Moyennant certaines informations, l'expérience acquise permet cependant de proposer des fourchettes de prédiction, s'agissant à la fois du tassement total et du tassement post-exploitation (Figure 32). Dans le cas d'un casier couvert, le tassement primaire étant complètement achevé, seule l'évaluation précise du coefficient de compression secondaire  $C_{\alpha\epsilon}^*$  se révèle nécessaire.



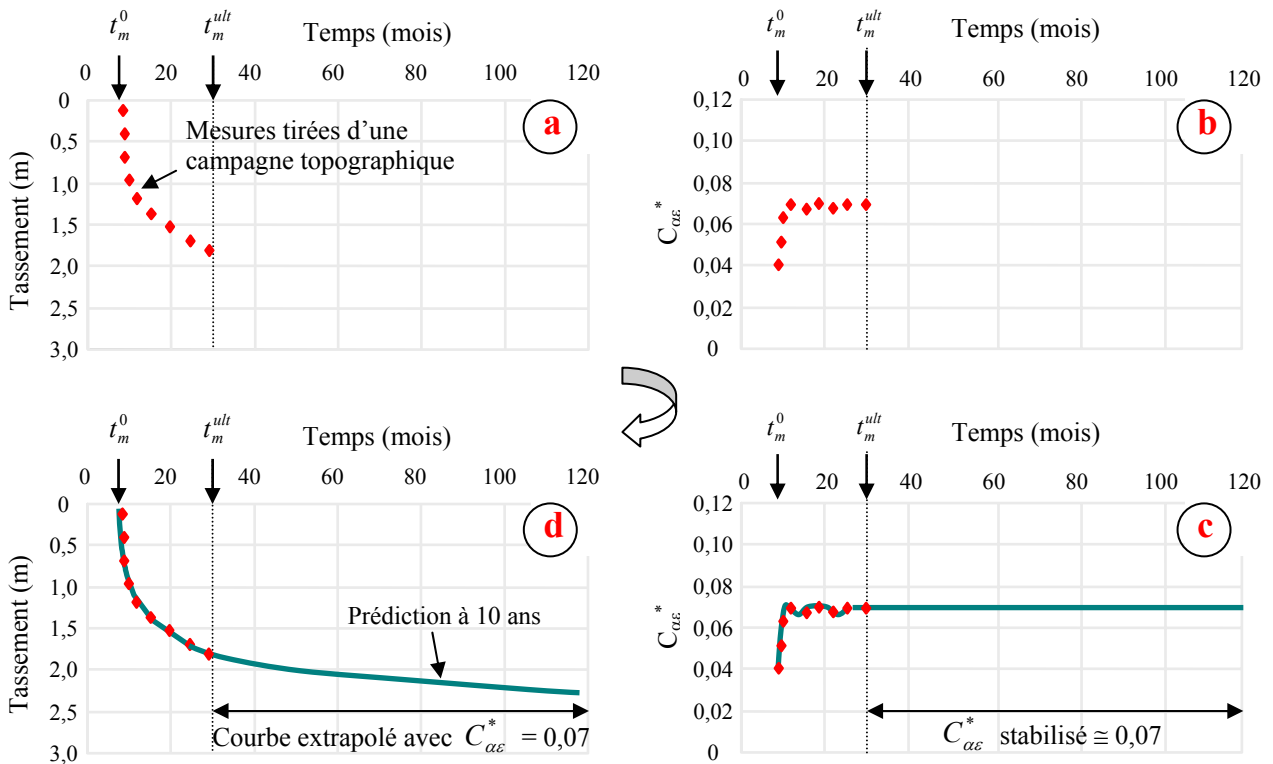
**Figure 32.** Fourchettes de prédiction des tassements par analyse directe (a) tassements pris depuis le début de la construction de la colonne (b) tassements pris à partir de la fin de la construction de la colonne (couverture comprise).

Lorsque l'alvéole présente une géométrie simple, notons que l'évaluation du vide de fouille libéré par les tassements peut se faire à partir du calcul pour une colonne de déchets étendue à l'échelle de l'alvéole à partir d'une surface équivalente de remblaiement intégrant un coefficient de forme.

### 3.3.3. Application du modèle ISPM par analyse inverse (calibration à partir de mesures de terrain)

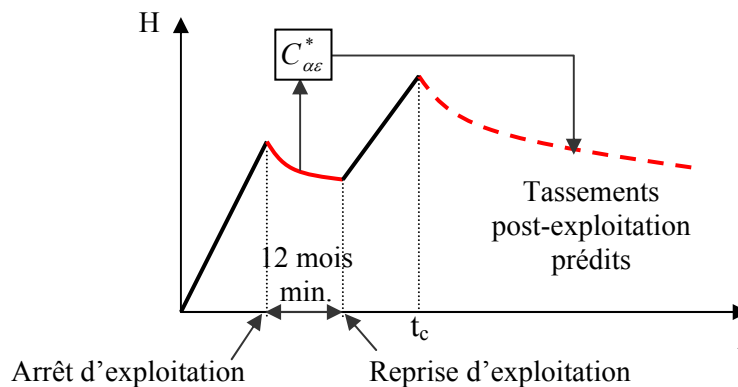
Compte tenu de la difficulté à caractériser forfaitairement le comportement du déchet, il est préférable s'agissant de casiers de stockage exploités et couverts d'associer à la démarche de prédiction une phase préalable de mesures de terrain. C'est le principe de l'analyse inverse qui consiste à calibrer le coefficient  $C_{\alpha\epsilon}^*$  à partir d'une campagne topographique de terrain de durée  $t_m^{ult} - t_m^0 > 12$  mois, où  $t_m^0$  représente le temps de mesure correspondant au levé topographique initial et  $t_m^{ult}$  le temps de mesure relatif au levé topographique ultime (Figure 33).

Chaque mesure (à  $t_m^1, \dots, t_m^i, \dots$ ) (Figure 33 (a)) permet de tirer une valeur correspondante de  $C_{\alpha\epsilon}^*$  (Figure 33 (b)). L'observation de sites réels sur des périodes pouvant aller jusqu'à 30 ans a montré que  $C_{\alpha\epsilon}^*$  tend presque toujours à se stabiliser au bout de quelques mois (généralement 6 à 9 mois après la fin d'exploitation) (Figure 33 (c)). La prise en compte de la valeur finale (stabilisée) de  $C_{\alpha\epsilon}^*$  permet de prolonger la portion de courbe de tassement obtenue expérimentalement (Figure 33 (d)).



**Figure 33.** Prédiction des tassements par analyse inverse à l'aide du modèle ISPM (a) tassement post-exploitation mesuré expérimentalement (b) coefficient de compression secondaire  $C_{ae}^*$  tiré des mesures de tassement (c) coefficient  $C_{ae}^*$  après stabilisation (d) tassement post-exploitation extrapolé au-delà de la période de mesure.

En terme de management opérationnel, les résultats tirés d'expérimentations sur site de hauteur supérieure à 15 m ont révélé des perspectives intéressantes. Un arrêt d'exploitation sur une alvéole en exploitation pendant une période supérieure ou égale à 12 mois peut en effet être mise à profit pour conduire des mesures topographiques de surface sur l'alvéole concernée par la période de repos. A partir des données relatives à la colonne inférieure (déchet ancien), on calibre le coefficient  $C_{ae}^*$  que l'on pourra utiliser pour prédire le tassement de la colonne complète (déchet ancien + déchet jeune) et ainsi permettre d'évaluer le niveau final de la couverture (Figure 34).



**Figure 34.** Méthodologie de prédiction des tassements post-exploitation à partir d'un suivi topographique intermédiaire lors d'un arrêt d'exploitation.

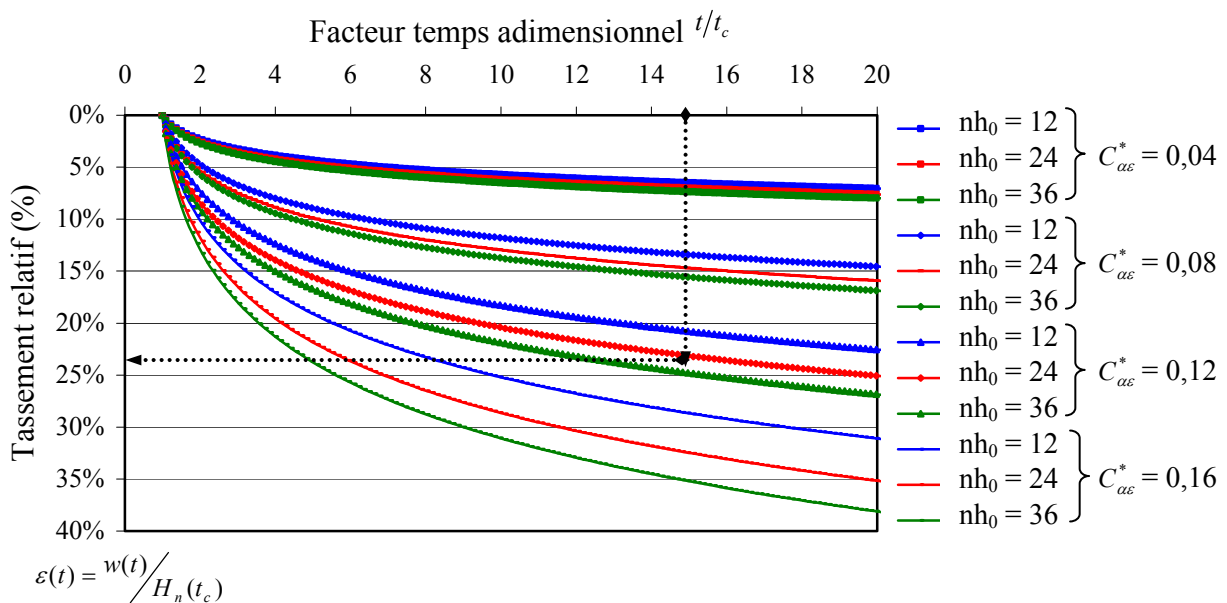
Par ailleurs, en présence d'alvéoles voisines recevant des déchets de composition grossièrement identique, stockés dans des conditions de mise en œuvre et de gestion hydrique analogues, un suivi des tassements réalisé sur une 1<sup>ère</sup> alvéole de référence permet de déterminer la valeur  $C_{ae}^*$  du coefficient de compression secondaire intrinsèque au déchet. A condition que les hauteurs de déchet ne soient pas excessivement variables d'une alvéole à l'autre, la valeur de  $C_{ae}^*$  déterminée sur la 1<sup>ère</sup> alvéole peut être réutilisée pour une prédiction des tassements des alvéoles voisines.

### 3.3.4. Conclusion et perspectives d'application du modèle ISPM

L'application du modèle ISPM exige une connaissance relativement précise de l'historique d'exploitation. Si cette condition peut s'avérer problématique dans le cas de sites anciens ou orphelins, cette difficulté disparaît s'agissant de CSD modernes. L'ultime stade de développement du modèle ISPM est aujourd'hui lancé avec pour perspective l'application de ce dernier au moyen de logiciels et d'abaques. Cet objectif représente un enjeu pour les exploitants car il devrait être possible, moyennant l'évaluation préliminaire de quelques paramètres d'exploitation (flux, composition, mise en œuvre et gestion hydrique du déchet) d'évaluer la capacité de stockage des alvéoles (sur la base du vide de fouille disponible) et d'anticiper sur le phasage d'exploitation des sites.

A titre d'exemple, les exploitants Onyx et Sita viennent chacun de se doter de logiciels de prédiction des tassements développés à partir du modèle ISPM.

En ce qui concerne la mise au point d'abaques de prédiction, un premier exemple est présentée ici (Figure 35) permettant de calculer la déformation post-exploitation d'une colonne de déchet dans le cas d'une alvéole dont la vitesse de montée du remblai de déchet n'a pas trop fluctué ( $\tau_1 = \tau =$  constante) et dont la couverture de surface (supposée représenter une charge  $q_c$  équivalente à 1 m de matériau minéral) a été installée très rapidement après la fin d'exploitation ( $t_c \cong t_n$ ). Les paramètres de temps  $t$  et  $t_c$  sont remplacés par un facteur temps adimensionnel  $t/t_c$  en fonction duquel est tracé  $\varepsilon(t) = w(t) / H_n(t_c)$ .  $nh_0$  représente la hauteur virtuelle de la colonne de déchets en l'absence de tout tassement.



**Figure 35.** Abaque de prédiction de la déformation post-exploitation  $\varepsilon$  en fonction de  $t/t_c$ ,  $nh_0$  et  $C_{ae}^*$  ( $h_0 = 1$  m ;  $C_R^* = 0,20$  ;  $\rho_0 = 0,8$  T/m<sup>3</sup> ;  $q_c = 18$  kPa).

L'intérêt de ce diagramme tient au fait que le paramètre  $C_{\alpha\epsilon}^*$  a une influence prépondérante :

- la gamme de variation du coefficient  $C_R^*$  tend en effet à être assez réduite (0,17 – 0,22) : ce dernier peut donc être fixé à 0,20 en première approche. Par ailleurs, une légère erreur sur la valeur de  $C_R^*$  a peu d'effet sur la valeur prédite de  $\epsilon(t)$ , compte tenu que le tassement primaire est achevé une fois la couverture finale mise en place ;
- l'influence de la masse volumique initiale du déchet ( $\rho_0$ ) est peu importante : il peut être montré qu'une fluctuation de 50 % sur sa valeur ( $0,8 \text{ T/m}^3 \pm 50 \%$ ) induit une erreur de prédiction maximum de 2,5 %, tout étant égal par ailleurs ;
- l'influence de la valeur de  $h_0$  (fixée par défaut à 1 m) est modérée : la prise en compte d'une épaisseur  $h_0$  égale à 50 cm induit une augmentation de  $\epsilon(t)$  à hauteur de 4,5 % ;
- $H_n(t_c)$  enfin est déduit de  $nh_0$  (hauteur virtuelle comprise entre 12 et 36 m) et  $C_{\alpha\epsilon}^*$  à l'aide du Tableau 5.

**Tableau 5.** Conversion entre la hauteur virtuelle ( $nh_0$ ) de la colonne de déchet et sa hauteur effective en fin de construction ( $H_n(t_c)$ )

nh <sub>0</sub>	H <sub>n</sub> (t <sub>c</sub> )			
	C <sub>αε</sub> <sup>*</sup> = 0,04	C <sub>αε</sub> <sup>*</sup> = 0,08	C <sub>αε</sub> <sup>*</sup> = 0,12	C <sub>αε</sub> <sup>*</sup> = 0,16
12 m	11,21 m	10,91 m	10,53 m	10,17 m
24 m	21,24 m	20,16 m	19,36 m	18,32 m
36 m	30,51 m	28,80 m	27,27 m	25,53 m

Exemple d'application de l'abaque de la Figure 34 et du Tableau 5 : Considérons une colonne de déchet dont on souhaite évaluer le tassement post-exploitation 30 ans après la pose de la couverture. On supposera que la colonne a été construite au cours d'une période de durée  $t_c = 2$  ans, que sa hauteur  $H_n(t_c)$  avoisine 25 m et que sa compressibilité secondaire est assez élevée (OM brute à forte teneur en déchets fermentescibles :  $C_{\alpha\epsilon}^* \cong 0,12$ ). Par interpolation linéaire à l'aide du Tableau 5, on évalue la hauteur virtuelle  $nh_0$  de la colonne à environ 33 m. En se reportant à la Figure 35 (avec  $t/t_c = 30 / 2 = 15$ ), on détermine une déformation  $\epsilon$  (30 ans) proche de 24 %, équivalente à un tassement post-exploitation de 6 m.

### 3.4. Conclusion sur la prédiction des tassements

Les modèles de prédiction des tassements répertoriés dans la littérature ont en commun de ne pas prendre en compte la spécificité du matériau déchet, caractérisé par son état de consolidation (surconsolidation partielle) et son histoire (âge croissant avec la profondeur). C'est le cas notamment du modèle de Sowers (1973) qui bien que basé sur des lois de comportement analogues à celles du modèle ISPM ne permet pas de prendre en compte le phasage d'exploitation de l'alvéole considérée. Une évolution du modèle de Sowers a été proposée par Bjarngard et Edgers (1990), caractérisée par l'introduction de 2 coefficients de compression secondaire. Toutefois, il a pu être montré (Olivier, 2003) que cette évolution ne fait que compenser artificiellement l'erreur engendrée par la non prise en compte de l'historique d'exploitation. De ce point de vue, le modèle ISPM permet, à partir d'un coefficient  $C_{\alpha\epsilon}^*$  unique, de prendre en compte correctement l'évolution du tassement de la colonne de déchet en fonction du temps.

A titre d'exemple, l'erreur relative engendrée par l'application du modèle de Sowers à la place du modèle ISPM est illustrée dans le Tableau 6 s'agissant d'une colonne de déchet de hauteur virtuelle 12, 24 ou 36 m et de caractéristiques analogues à celles de l'exemple précédent (Figure 35). L'erreur de prédiction de la déformation post-exploitation à 10 ans apparaît comprise entre 8

et 45 %, suivant le temps de construction considéré (6, 12, 24 ou 36 mois) et la période de calibration de  $C_{ae}^*$  (12 ou 24 mois) (Tableau 6). Ce résultat correspond au cas d'une colonne élevée à un rythme régulier au cours du temps : des erreurs plus importantes sont à prévoir s'agissant d'alvéoles exploitées en plusieurs phases interrompues par des périodes d'arrêt d'exploitation.

**Tableau 6.** Illustration de l'erreur constitutive du modèle de Sowers vis-à-vis du modèle ISPM ( $|\varepsilon_{ISPM} - \varepsilon_{Sowers}| / \varepsilon_{ISPM}$ ) à travers la prédiction de la déformation de surface à 10 ans (à partir de la fin d'exploitation) sur la base d'une calibration de  $C_{ae}^*$  après 12 mois (ou 24 mois). Colonne de déchets de caractéristiques identiques à celles de la Figure 35.

Hauteur virtuelle ( $nh_0$ )	-	12				24				36			
Temps de construction ( $t_c$ )	mois	6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36
$ \varepsilon_{ISPM} - \varepsilon_{Sowers}  / \varepsilon_{ISPM} (10ans)$	%	12,5	25,1	37,6	44,5	10,8	23,1	35,4	42,1	10,2	22,4	34,5	41,1
Calibration à 12 mois													
$ \varepsilon_{ISPM} - \varepsilon_{Sowers}  / \varepsilon_{ISPM} (10ans)$	%	8,6	17,2	26,5	32,1	7,6	15,9	25,0	26,2	7,2	15,4	24,4	29,7
Calibration à 24 mois													

#### **4. Accélération des tassements et de la stabilisation mécanique des déchets**

Dans un contexte de saturation des sites existants et de risque de pénurie d'ici 2010 à 2014 (Ademe, 2003), la valorisation des capacités de stockage devient plus que jamais un point clé, tant pour les pouvoirs publics que les exploitants. Deux réponses peuvent ainsi être encouragées en parallèle, à savoir :

- la limitation des déchets à la source (qui passe essentiellement par une réduction des emballages et par une évolution du comportement des ménages) ;
- l'utilisation accrue des capacités de stockage par optimisation du phasage d'exploitation et traitement des déchets.

C'est ce dernier point que nous nous proposons d'aborder ici à travers la présentation des techniques de prétraitement bio-mécanique, de recirculation des lixiviats et enfin de post-traitement par consolidation statique ou dynamique. L'application de ces techniques reste de fait assez timide en France.

##### **4.1. Prétraitement bio-mécanique**

La directive 1999/31/EC de la Commission Européenne fixe pour objectif une réduction des quantités de déchets biodégradables stockés en CSD. Sur la base des quantités stockées en 1995, une réduction de 25 % des déchets organiques est fixée pour 2006, 50 % d'ici 2009 ou encore 65 % d'ici à 2016. En complément des filières classiques permettant d'atteindre ces objectifs (développement de la valorisation, du compostage et de l'incinération), l'Allemagne et l'Autriche notamment proposent une filière supplémentaire qui consiste à prétraiter bio-mécaniquement les déchets avant enfouissement. Cela passe notamment par le criblage et le tri des déchets, leur broyage et leur traitement biologique par voie aérobie (aération forcée) ou anaérobie (méthanisation).

En France, cette filière est moins encline à se développer car les objectifs de la directive européenne sont respectés jusqu'à 2009 au moins (du fait des pourcentages incinérés et de la valorisation des boues de STEP, des déchets verts, etc.). Néanmoins, trois unités de prétraitement

de déchets bruts ou résiduels associées à des unités de stockage viennent de voir le jour en France (Carpentras, Mende et Lorient).

En terme géotechnique, les implications du prétraitement sont multiples. Tout d'abord, les déchets prétraités s'apparentant plus à des sols qu'à des déchets bruts, leur compactage peut être envisagé au moyen de rouleaux lisses (après humidification à l'optimum Proctor). Des densités de compactage très élevées sont observées, typiquement de 15 à 40 % supérieures aux valeurs observées pour des déchets bruts de composition analogue. Au cours de la phase suivante de chargement, la densification du matériau s'accroît encore jusqu'à atteindre des niveaux de densité pouvant aisément dépasser 1,20. Bien que très intéressantes en terme de capacité de stockage, de telles caractéristiques de densité peuvent néanmoins entraîner des désagréments liés à la diminution de la perméabilité du matériau : apparition de nappes perchées, captage insuffisant des biogaz, méthanogénèse instable.

Si l'on se concentre plus particulièrement sur la période de post-exploitation (après pose de la couverture finale), on s'attend intuitivement à ce que ces déchets prétraités tassent moins que des déchets bruts de composition analogue. Il convient toutefois de noter le faible retour d'expérience en la matière. S'agissant de déchets mono-spécifiques ou broyés, la structure homogène du matériau semble en outre assurer un tassement plus homogène dans l'espace, garantissant ainsi une réduction substantielle des tassements différentiels. En revanche, la cohésion du déchet se trouve affaiblie par l'absence de l'effet de renforcement qui caractérise les éléments fibreux. Si l'on ajoute à cela l'augmentation possible des contraintes (en présence notamment de pressions interstitielles) se pose alors la question de la stabilité des tumulus à court comme à long terme.

#### **4.2. Recirculation des lixiviats ('bioréacteurs')**

Ces dernières années ont été marquées par l'entrée en fonctionnement à titre expérimental de plusieurs casiers 'bioréacteur', aux Etats-Unis, en Europe et en Australie notamment. Le 'bioréacteur' se distingue du casier de stockage classique par la recirculation de lixiviat (ou d'eau) dans le massif de déchet. De nombreux travaux ont montré en effet que la vitesse de biodégradation est étroitement liée à la teneur en eau des déchets, avec un seuil minimum voisin de 15 à 30 % (masse d'eau rapportée à la masse de déchet solide) au-dessous duquel la fermentation semble bloquée. En outre, la recirculation permet de répartir au mieux populations microbiologiques, enzymes, nutriments et agents inhibiteurs qui conditionnent le déroulement normal des réactions biochimiques dans le déchet.

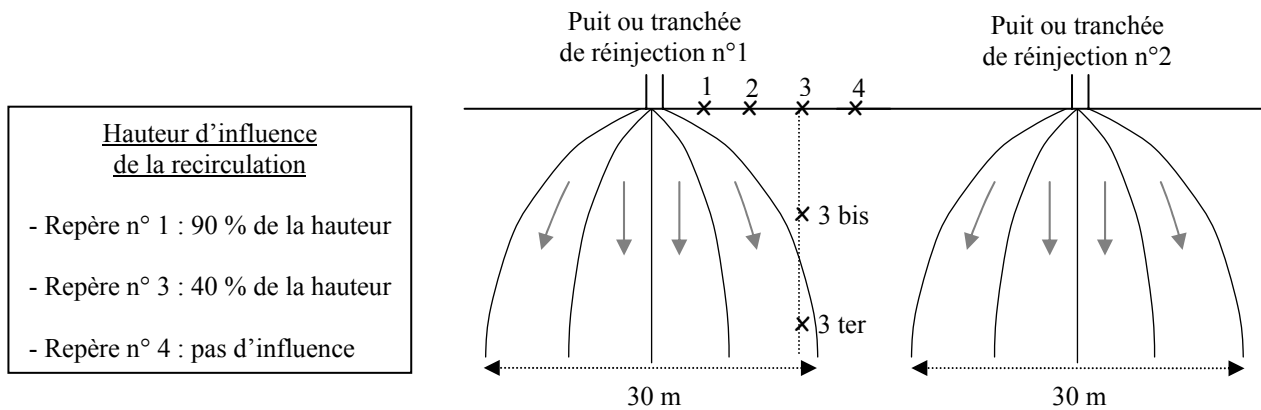
Si l'effet de la recirculation des lixiviats sur la biodégradation (et par suite les tassements) est manifeste à l'échelle de pilotes de laboratoire (Olivier and Gourc, in press.) ou de mini-casiers expérimentaux représentatifs de quelques milliers de tonnes de déchet [Sonoma County (USA), Yolo County (USA)], les conditions d'application à grande échelle ne sont pas encore totalement finalisées. Considérant les quelques sites bioréacteur ayant fait l'objet d'un programme R&D incluant un suivi des tassements sur une période minimale de 2 ans [(Lyndhurst, Australie) ; (Sandtown, USA) ; (Lons-le-Saunier, France)], on note un certain nombre de faiblesses récurrentes parmi lesquelles :

- casier témoin (sans recirculation) absent ou sous-instrumenté ;
- débits réinjectés fluctuants ou incertains ;
- infiltrations via la couverture mal évaluées ;
- mesures insuffisantes en regard de la taille du casier étudié.

Une autre difficulté tient à la répartition inégale (horizontalement comme verticalement) des fluides réinjectés dans le massif de déchet (Figure 36). Que la réinjection s'opère au moyen de



puits verticaux, de drains sub-horizontaux ou encore par l'association des deux dispositifs, se pose le problème de la conception du réseau en lien avec le rayon d'action des sources d'injection. Accélérer la stabilisation d'un massif de déchet suppose que l'on évite qu'une partie importante de celui-ci reste non ou peu affectée. Point central auquel des campagnes de terrain associant auscultation géophysique et suivi des tassements tentent actuellement de répondre sur les sites bioréacteur de Lons-le-Saunier et Grand'Landes.



**Figure 36.** Illustration du rayon d'action des flux de lixiviat recirculés.

### 4.3. Consolidation par chargement statique ou dynamique

Les deux techniques présentées ci-dessous sont classiques dans le cas de remblais de terre (géotechnique routière, fondations), beaucoup moins en revanche s'agissant de matériaux dégradables au cours du temps. Elles sont abordées à la fois dans une perspective de gain de volume stockable et de stabilisation à long terme.

#### ➤ Consolidation par chargement statique

Cette 1<sup>ère</sup> technique consiste à disposer une surcharge sur un massif de déchet avec pour objectif :

- à court terme : comprimer activement le déchet sous l'effet du poids de la surcharge ;
- à long terme : minimiser les tassements post-exploitation de manière à les rendre compatibles avec les critères de requalification du site considéré.

En France, quelques rares expérimentations de chargement statique de déchets par remblais de terre ont été menées au début des années 1980 sur les décharges de Roanne et d'Arnouville [Cartier (1981), Cartier et Baldit (1983)]. Plusieurs expérimentations du même type ont été entreprises au Canada et aux Etats-Unis au cours des deux dernières décennies. Si le tassement primaire (immédiat) résultant du chargement a pu être mesuré, le suivi n'a pas permis d'estimer l'effet du chargement sur le tassement secondaire (retardé), dont l'amplitude détermine en grande partie le comportement du matériau à long terme.

Deux campagnes de mesure interne des tassements menées sur des alvéoles caractérisées par un remplissage en 2 phases successives séparées par un temps de repos (CSD de Chatuzange et de Lapouyade) ont toutefois permis de tirer quelques enseignements sur l'effet retardé de l'application de surcharges sur un déchet ménager (Olivier, 2003). Bien que ces études (en cours depuis 3 ans) nécessitent d'être poursuivies, elles ont permis de dresser deux constats provisoires, à savoir que :

- le rechargement d'une colonne de déchet de grande hauteur ( $H > 20$  m) a peu d'effet sur les déformations à long terme : maintien d'une cinétique quasi-inchangée à l'issue d'une phase d'accélération des tassements de quelques mois ;

- le rechargement d'une colonne de déchet de faible hauteur ( $H < 12$  m) semble en revanche entraîner une accélération durable de la cinétique de tassement.

Si la technique du chargement statique garde son intérêt évident de gain de volume à court terme, les observations précédentes suggèrent qu'il ne garantit en rien une meilleure stabilisation à moyen terme. L'impact à long terme reste quant à lui incertain.

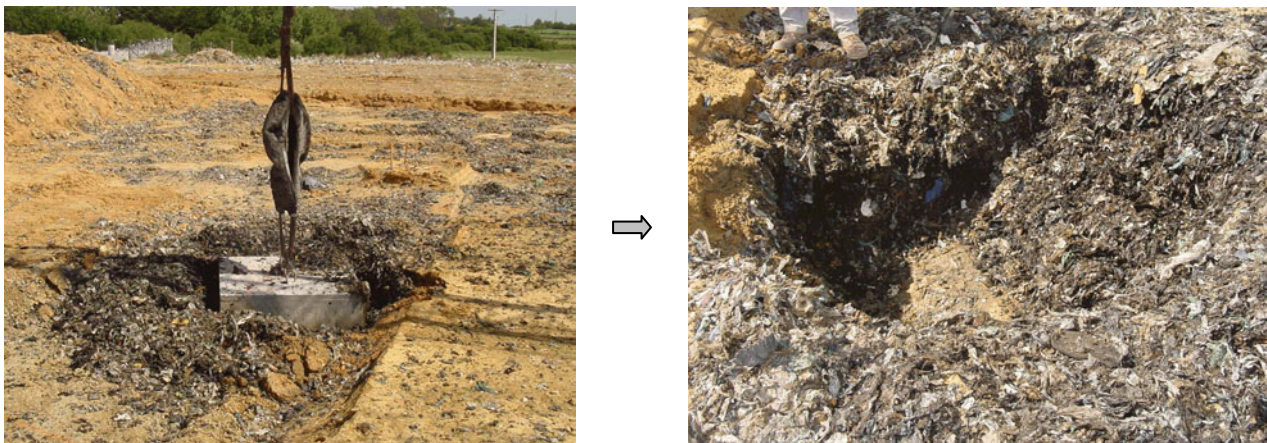
### ➤ **Consolidation par chargement dynamique**

Le compactage dynamique est un procédé parfois utilisé pour les déchets avec pour objectif de :

- consolider les couches de déchet en place afin d'augmenter la capacité de stockage d'un casier ;
- limiter l'amplitude totale des tassements et maîtriser leur évolution dans le temps de manière à éviter tout risque de rupture / poinçonnement de la couche d'étanchéité de couverture sous l'effet des tassements différentiels, y compris dans le cas d'une extension verticale de casier ('*piggy-backing*') ;
- traiter d'anciens dépôts de déchets dans le cadre de travaux de requalification (voirie, etc.) pour lesquels le volume de matériau ne permet pas d'envisager le curage de la zone.

C'est en lien avec ce dernier objectif que d'anciennes décharges aux Etats-Unis ont été chargées dynamiquement dans le cadre de projets de requalification d'envergure : un complexe de loisirs à Détroit, différents immeubles à Memphis et San-Diego, l'université de Seattle et même l'aéroport *La Guardia* à New York !

La technique consiste à quadriller une zone de stockage de déchets et à appliquer à intervalles réguliers une contrainte dynamique occasionnée par la chute libre d'un pilon de 6 à 30 tonnes d'une hauteur de 10 à 30 m (Figure 37). La profondeur d'influence maximale est ajustable dans une gamme de 3 à 9 m, fonction de la nature des déchets et de ses caractéristiques physiques (porosité et teneur en eau), de la forme et de la masse du pilon et enfin de la hauteur de chute libre. En comparaison, la profondeur d'influence d'un compacteur statique courant varie approximativement de 0,60 m à 2 m.



**Figure 37.** Illustration de la consolidation dynamique (CSD de Givrand) (a) Chute du pilon (b) Cavité formée après pilonnage.

En terme quantitatif, des tassements de 5 à 25 % (pour une moyenne de 10 %) sont observés après sollicitation dynamique. Ceci se traduit par une augmentation par un facteur 3 à 4 de la raideur des déchets. Pour un déchet à forte composante biodégradable rapide (déchets ménagers putrescibles, déchets verts), un minimum de 4 à 5 années de stockage semble souhaitable (dans des conditions de méthanogénèse stable) pour que suffisamment de vides aient été libérés sous

l'effet de la dégradation et que le compactage dynamique soit pleinement profitable (effondrement de la structure ?). Pour un matériau déchet à composante biodégradable essentiellement lente (papier, carton, certains DIB), un minimum de 10 à 15 ans est préférable.

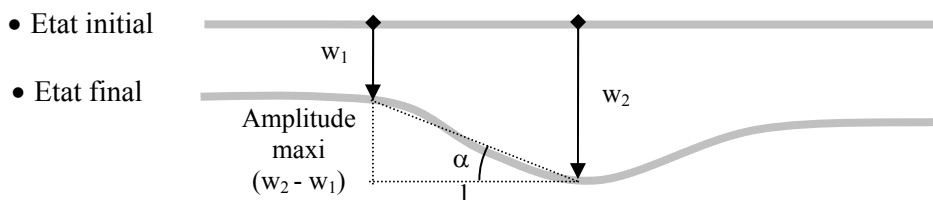
Pour finir, il convient de garder à l'esprit que l'efficacité de la consolidation dynamique est limitée à la fois par :

- la nature du déchet (élasticité du squelette, porosité, dégradation) ;
- la profondeur du déchet (profondeur d'action < 9 m) ;
- la teneur en eau du déchet (efficacité quasi-nulle en cas de saturation, l'énergie de compactage étant absorbée par l'eau elle-même).

## 5. Contrôle des tassements différentiels

### 5.1. Evaluation des tassements différentiels

Deux valeurs sont nécessaires pour définir un tassement différentiel : l'amplitude maximale de flexion ( $w_2 - w_1$ ) et la distance ( $l$ ) entre le rebord et le fond de la dépression (Figure 38).



**Figure 38.** Schéma d'évaluation d'un tassement différentiel

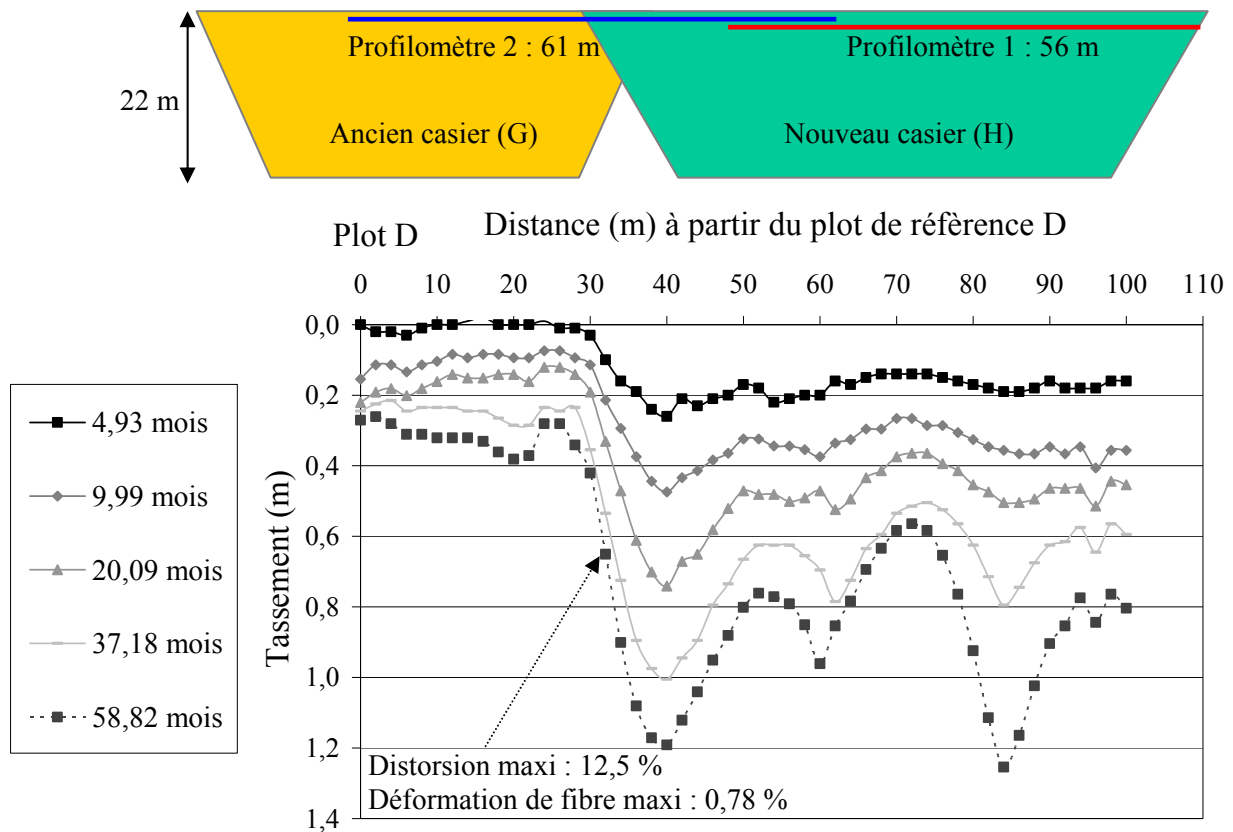
Ces valeurs permettent de définir 2 paramètres pris indifféremment comme **critère de tassement différentiel admissible** :

- Distorsion (%) :  $100 \left( \frac{w_2 - w_1}{l} \right)$  ( $= \tan \alpha$ ) où  $\alpha$  est l'angle moyen de fléchissement

- Déformation de fibre (%) :  $\frac{\delta l}{l} = 100 \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)$  (indépendant de la largeur de la dépression)

Il faudrait pour une analyse de l'effet de distorsion également prendre en compte l'épaisseur  $h_c$  de la couche de couverture. L'effet d'un effondrement localisé sera d'autant moins pénalisant que la portée sera moins large ( $l$  petit) et que l'épaisseur  $h_c$  sera importante. On peut montrer que le rapport  $(l^2/h_c)$  est déterminant de ce point de vue.

En relation avec les campagnes topographiques de terrain, les tassements différentiels peuvent être évalués à partir de profils de mesure resserrés (repères classiques de surface ou profilomètres). La Figure 39 illustre un suivi des tassements à l'aide de 2 profilomètres installés à cheval sur 2 casiers adjacents de géométrie identique mais d'âge différent (casier G : début du levé topographique 13 mois après la fin d'exploitation, casier H : 4 mois seulement). L'analyse point par point du profil de mesure continu (1 mesure chaque 2 m) permet de déterminer la distorsion maxi (12,5 %) et par suite la déformation maxi le long des deux tubes (0,78 %).



**Figure 39.** Evolution du profil de tassement en fonction du temps (CSD de Montech - casiers G et H – levé initial le 29/06/1998).

## 5.2. Dispositions constructives en lien avec les couvertures de stockage

Pour conforter la bonne tenue des couvertures face aux tassements différentiels, il est possible en premier lieu d’agir sur la mise en œuvre des déchets lors de la phase d’exploitation en veillant à :

- éviter la concentration de déchets inertes (gravats, débris de construction), de ‘monstres’ (les appareils ménagers favorisant les effondrements...) ou encore de déchets très compressibles (boues, fruits et légumes, etc.) ;
- assurer un compactage homogène, notamment au voisinage des talus et des puits verticaux ;
- assurer une humidification homogène du déchet à la fois en phase d’exploitation et de post-exploitation.

Une fois la phase d’exploitation terminée, il est possible de différer l’installation de la couverture finale incluant au minimum une couche d’étanchéité et des couches de drainage (effluents gazeux, eau de ruissellement). Rappelons que la mise en place retardée de la couverture finale présente l’avantage de laisser s’écouler la phase initiale de tassement au cours de laquelle la cinétique est la plus forte. Ainsi, il peut être judicieux d’envisager la **mise en place de la couverture en deux temps** suivant les 2 séquences suivantes :

- installation d’une couverture provisoire immédiatement après la fin d’exploitation ;
- installation de la couverture finale après quelques années.

Compte tenu toutefois des exigences de recyclage des biogaz, peu d’exploitants retiennent la solution précédente. Il reste alors à agir sur le choix et la mise en œuvre de la couverture dont la couche d’étanchéité est caractérisée par un **critère de perméabilité**, un **critère de résistance à la**

**dessiccation** (pour les couches minérales) et enfin un **critère de déformabilité** (recherche d'une flexibilité suffisante pour supporter les tassements sans fissuration).

De fait, les barrières de couverture compactées sont presque toujours excessivement rigides. La résistance est privilégiée par rapport à la flexibilité, alors que c'est l'option inverse qui devrait être envisagée. Du fait de leur anisotropie et leur faible résistance à la dessiccation et aux déformations, les argiles satisfont rarement aux spécifications auxquelles elles sont censées répondre, à commencer par la perméabilité. La déformation que peut subir une couche de matériau argileux compacté avant que n'apparaissent des fissurations dépend pour une large part de son état d'hydratation. Les matériaux dont la teneur en eau est supérieure à l'optimum de compactage Proctor peuvent subir plus de déformations que des matériaux caractérisés par une teneur en eau inférieure à cet optimum. Suivant leur composition, leur teneur en eau et leur densité, les argiles sont en définitive capables de supporter sans fissuration des **déformations comprises entre 0,1 et 1 %, équivalentes à des distorsions de 5 à 15 % environ**.

Dans ce contexte, une manière de prévenir les effets des tassements différentiels consiste à privilégier des matériaux synthétiques (nappes polymères) souples et extensibles, dans la mesure où ils répondent par ailleurs aux fonctions premières (étanchéité, drainage). On utilisera alors des **géomembranes** ou encore des **géosynthétiques bentonitiques**, seuls ou associés à une couche minérale. En comparaison des argiles courantes, la plupart des géomembranes sont capables de supporter des déformations comprises entre 5 et 20 %. On notera qu'une solution alternative pour diminuer la macro-fissuration des argiles pourrait consister à les renforcer par des fibres courtes (procédé analogue à celui des bétons de fibres).

En complément, la mise en place d'un réseau de dégazage aérien supporté par des cannes télescopiques permet (jusqu'à un certain point) d'éviter l'apparition de points bas sur le réseau. Pour de plus amples détails sur le choix et le dimensionnement des couvertures de CSD, il est conseillé de se référer au « Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés » (ADEME - BRGM, 2001).

## **6. Tassements des déchets aux voisinage des talus**

### **6.1. Quel risque de rupture à long terme pour un tumulus de déchet ?**

Quelques cas de rupture de talus sont rapportés dans la littérature résultant essentiellement de glissements survenus le long des barrières d'étanchéité - drainage de fond et des interfaces déchet - nappes géosynthétiques. D'importants désordres peuvent également survenir suite à la rupture du sol de fondation, à la rupture en traction des nappes géosynthétiques ou au glissement de la barrière de couverture.

Plus rares sont les ruptures survenant à l'intérieur du déchet lui-même. Comme pour les sols fins, **l'eau constitue souvent la source principale de désordre dans les déchets** avec l'apparition de surpressions interstitielles résultant de la saturation en eau (phénomène potentiellement accentué par la réinjection de lixiviats), la présence de couches de faible perméabilité – déchet surcompacté, couches de sol intermédiaires (couvertures journalières) – ou encore l'absence ou le dysfonctionnement des drains d'évacuation des lixiviats ou du biogaz.

Exceptionnellement, une rupture dans la masse du déchet peut survenir (en l'absence de pression interstitielle) le long de l'interface entre deux phases de stockage de déchet (plan de glissement préférentiel) comme ce fut le cas sur le site de Bulbul Drive en Afrique du Sud (Figure 40).



**Figure 40.** Photo aérienne du talus de Bulbul Drive (Afrique du Sud) avant et après rupture (Brink et al., 1999)

En dépit de leur caractère spectaculaire, de telles ruptures de talus restent très rares : tout au plus quelques cas sont répertoriés chaque année dans le monde. En comparaison, les nombreux désordres causés par les **grandes déformations de tumulus** de déchets (sans amorce de rupture) représentent un impact financier plus important. Ces déformations de talus sont en effet à la **source de multiples dysfonctionnements** (inversions de pente, rupture localisée des barrières de couverture) préjudiciables d'un point de vue à la fois sécuritaire et économique (fuites d'effluents liquides et gazeux, surcoûts de maintenance suite aux interventions répétées).

## 6.2. Analyse des déformations 3D au voisinage des talus

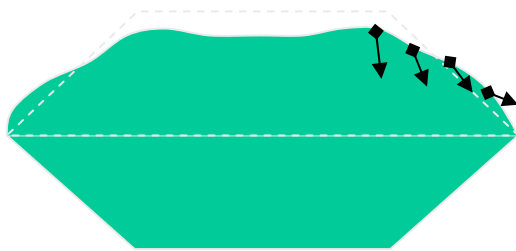
La méthode d'analyse de stabilité de talus la plus courante, par analogie avec les méthodes employées pour les sols, est l'**approche à l'équilibre limite à la rupture** qui consiste à rapporter la contrainte agissant le long de la surface de glissement potentielle à la résistance disponible du matériau. Cela implique à la fois que :

- la résistance du matériau soit clairement établie (critère à définir) ;
- l'hypothèse du mécanisme de rupture considéré soit pertinente ;
- la méthode d'évaluation de la sécurité soit établie (coefficient de sécurité à définir).

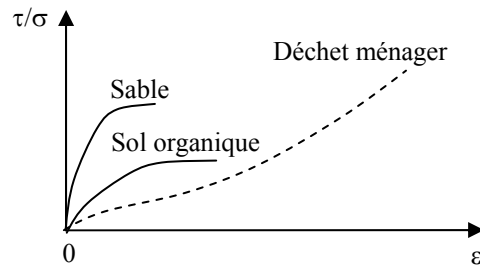
Une telle approche à l'état limite traduit cependant assez mal les propriétés rhéologiques du matériau déchet. Tandis que la plupart des matériaux minéraux atteignent leur pic de cisaillement pour des déformations voisines de 5 %, les déchets ménagers ont en effet la particularité de voir leur résistance croître jusqu'à des déformations très importantes (Figure 41). Cette différence de comportement s'explique notamment par la présence d'éléments nappes (plastique, papier, textile, etc.) dans le matériau. Il a été montré que ces matériaux ainsi renforcés étaient capables de mobiliser des forces de traction ('cohésion de fibre'), ce qui explique au passage leur capacité à être talutés sur des pentes quasi verticales (comportement type 'sol renforcé').

Les phénomènes observés traduisent plutôt de grandes déformations de fluage que des ruptures franches. Comme pour tout ouvrage en terre, en suivant les Eurocodes, on devrait associer à un calcul aux ELU (Etats Limites Ultimes) un calcul aux ELS (Etats Limites de Service) prenant en compte un **critère de déformation maxi jugé acceptable** suivant le risque considéré. Des recherches viennent d'être lancées en ce sens compte tenu d'une part de l'intérêt croissant des DRIRE pour ce problème et d'autre part des enjeux économiques pour les exploitants (optimisation des volumes exploitables par raidissement des talus).

La déformée du talus est-elle significative :



- d'un **fluage sous contrôle** ?
- d'une **rupture à long terme** ?



**Figure 41.** (a) Schéma d'évolution de la déformée (2D) d'un talus de déchet au cours du temps. (b) Courbe d'évolution des contraintes tangentielles ( $\tau$ ) rapportées à la contrainte de confinement ( $\sigma$ ) dans un essai de cisaillement direct en fonction de la déformation ( $\varepsilon$ ) de l'échantillon.

### 6.3. Dispositions sécuritaires en lien avec les instabilités de talus

Mis à part quelques cas isolés, les désordres affectant les talus de déchet sont presque toujours précédés de signes avant-coureurs : accélération des déformations, apparition de fissures, montée en charge (hydraulique) du massif de déchet. Un suivi continu des ouvrages sensibles s'impose par conséquent, réalisé à partir de mesures topographiques de surface (§ 2.2) doublées si possible d'auscultations internes au moyen d'inclinomètres verticaux.

S'agissant du suivi de surface, il est essentiel de compléter le suivi vertical par un suivi horizontal ( $x, y$ ), sous la forme d'alignements de points dans le sens de la pente, incluant à la fois le pied, la crête de talus et les risbermes intermédiaires.

La pose d'inclinomètres verticaux permet en outre de tirer des profils de déplacements latéraux en fonction de la profondeur suivant 2 directions prédéfinies (N-S / E-O ou d'après les axes de symétrie du talus). Notons qu'un appareillage inclinométrique vient d'être conçu pour être implanté à l'intérieur des puits de biogaz (Goedecke et al., 2003). Enfin, il peut s'avérer intéressant d'associer aux tubes inclinométriques des extensomètres de forage (plaques aimantées ou tubages 'Sondex') (§ 2.3) permettant de suivre les profils continus de tassement des déchets.

## 7. Conclusion générale

Dans un contexte de rationalisation croissante de la gestion des déchets ménagers et assimilés de classe II, le contrôle et la prédiction des tassements des déchets deviennent des aspects à part entière du suivi des CSD modernes. Le suivi et l'analyse de ces tassements se placent simultanément dans une démarche d'ordre sécuritaire et économique. Par ailleurs, les recherches en cours ont montré que la compressibilité du déchet constituait à bien des égards un indicateur de l'évolution de l'état du matériau, complémentaire en cela aux campagnes de mesures hydriques et biochimiques.

Dans ce guide, nous avons illustré en premier lieu les enjeux relatifs à la problématique 'tassements' à la lumière des impératifs de durabilité des couvertures et des structures associées. Dans un second temps, nous avons apporté des éléments techniques relatifs à l'instrumentation des sites et des outils méthodologiques en vue de la mise en valeur des données de terrain (organisation des campagnes de mesure, analyse des données collectées). Il a par ailleurs été dressé un état des connaissances sur la modélisation des tassements, avec notamment la

présentation du Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements (modèle ISPM) qui permet d'orienter le suivi des CSD dans le sens d'une meilleure anticipation des tassements à long terme. En complément, les principales techniques de traitement des déchets (prétraitement bio-mécanique, recirculation des lixiviats, consolidation statique et dynamique) ont été évaluées sous l'angle de la stabilisation mécanique des déchets. Enfin, les tassements différentiels et les déformations des talus de déchets ont été abordés plus particulièrement suivant une démarche de suivi et de contrôle.

Deux perspectives opérationnelles méritent sans doute d'être rappelées ici. Du point de vue de la stabilisation mécanique des déchets tout d'abord, l'expérience suggère que la durée de post-exploitation devrait à l'avenir être considérée à partir d'indicateurs objectifs clairement définis. S'agissant de sites modernes suivis en tassement aussitôt après la fin d'exploitation, on pourrait par exemple considérer le tassement survenu au cours de la dernière année de suivi rapporté au tassement cumulé depuis la fin d'exploitation, autrement dit  $[w(t) - w(t - 1an)]/w(t)$ . Le ratio ainsi obtenu pourrait être confronté à un critère de stabilisation mécanique correspondant à un seuil donné à déterminer en fonction des contraintes liées à la requalification du site. Notons toutefois que pour garantir totalement la stabilité d'un massif de déchet, un tel indicateur devrait nécessairement être couplé à d'autres indicateurs bio-physico-chimiques à valider (analyse sur la fraction solide et la fraction liquide).

Sur un plan réglementaire enfin, compte tenu des progrès récents réalisés dans le domaine de la mesure des tassements (§ 2.) et de leur prédiction à long terme (§ 3.), le calcul des cotes limite d'exploitation (autorisées par arrêtés préfectoraux) mériterait d'être abordé de manière plus systématique. Moyennant le respect de procédures d'évaluation rigoureuses, il serait possible en effet de prendre en compte les tassements post-exploitation par anticipation (en mentionnant des cotes limite après tassements).



## **Bibliographie (références en français)**

- Aboura, A. (1999) Etude expérimentale du comportement mécanique de matériaux granulaires non conventionnels. Thèse de doctorat, Laboratoire Lirigm, Université de Grenoble, 288 p.
- ADEME (2003) Les marchés des activités liées aux déchets – Situation 2002/2003 et perspectives 2004. Publication ADEME, Collection Données et références, 148 p. (téléchargeable sur [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)).
- ADEME-BRGM (2001) Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés. Publication ADEME - BRGM, 167 p.
- ADEME-BRGM (1994) Définition des éléments constitutifs nécessaires à une couverture finale en fonction des exigences des différents types de décharges. Rapport d'avancement. Marché ADEME – BRGM 40 400 89. Rapport BRGM n° 1893, 101 p.
- Cartier, G. (1981) Comportement géotechnique des résidus urbains. *Revue Française de Géotechnique*, n°14 bis, pp. 85-90.
- Cartier, G. et Baldit, R. (1983) Comportement géotechnique des décharges de résidus urbains. *Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers des Ponts et Chaussées*, Vol. 128, pp. 55-64.
- Filliat, G. (1981) La pratique des sols et fondations. Editions du Moniteur, Paris.
- Gourc J.P. et Olivier F. (2002) Quelques aspects de l'approche géotechnique des Centres de Stockage de Déchets. *Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG)*, Nancy.
- Hébé, I. (2003) Des déchets stockés dans de bonnes conditions. *La Lettre Ademe*, n° 89, p. 5.
- Magnan, J.P. et Deroy, J.M. (1980) Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages. *Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, n° 109, pp. 45-52.
- Modecom (1993) Méthode de caractérisation des ordures ménagères. Guides et cahiers techniques de l'ADEME.
- Olivier, F. (2003) Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 334 p. (Document téléchargeable sur : [www-lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/foivier.html](http://www-lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/foivier.html)).
- Onyx (2000) Guide du compactage dans les centres de stockage de déchets ménagers et assimilés – principes généraux. Collection Les Guides d'OCS, n° 1, 40 p.
- Simecsol (1996) Protocole de mesure in situ de densité des déchets ménagers. Rapport Ademe, 44 p.
- Thomas, S. (2000) Centres de Stockage de Déchets - Géomécanique des déchets et de leur couverture. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 327 p.

## **Bibliographie générale (références en anglais)**

- Asaoka, A. (1978) Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, n° 18, pp. 87-101.
- Bjarngard., A. and Edgers, L. (1990) Settlement of municipal solid waste landfills. *Proc. 13<sup>th</sup> Annual Madison Waste Conference*, Madison, pp. 192-205.
- Bouthot, M., Blond, E., Quesnel, P., Fortin, A., Vermeersch, O., Davidson, S. and Mlynarek, J. (2003) Landfill extension using piggy-back as reinforcement: discussion and case study in Quebec. *Proc. Sardinia 2003, 9<sup>th</sup> International Landfill Symposium*, Cagliari
- Brink, D., Day, P.W., and Du Prez, L. (1999) Failure and remediation of Bulbul drive landfill: Kwazulu-Natal, South Africa. *Proc. Sardinia 99, 7<sup>th</sup> International Landfill Symposium*, Cagliari, Vol. III, pp. 555-562.
- Edil, T.B., Ranguette, V.J. and Wuellner, W.W. (1990) Settlement of municipal refuse. *Geotechnics of waste refuse - theory and practice*, ASTM, Special Technical Publication 1070, pp. 225-239.
- Gandolla, M., Dugnani, L., Bressi, G. and Acaia, C. (1992) The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites. *Proc. 6<sup>th</sup> International Solid Waste Congress and Exhibition*, Madrid, pp. 1-17.
- Gibson, R.E. and Lo, K.Y. (1961) A theory of soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytechnica Scandinavica*, C:10, n° 296, pp. 1-15.
- Goedecke, H., Ziehmann, G. and Fricke, K. (2003) Measurement of horizontal deformation of Landfill. *Proc. Sardinia 2003, 9<sup>th</sup> International Landfill Symposium*, Cagliari, 7 p.
- Grisolia, M., Napoleoni, Q. and Tancredi, G. (1995) Contribution to a technical classification of MSW. *Proc. Sardinia 95, 5<sup>th</sup> International Landfill Symposium*, Cagliari, Vol. II, pp. 703-710.
- Ling, H.I., Leschinsky, D., Yoshiyuki, M. and Toshinori, K. (1998) Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, n° 1, pp. 21-28.
- Olivier, F. and Gourc J.P. (in press) Hydro-mechanics of MSW subject to leachate recirculation in a large scale compression reactor. *Waste Management Journal*.
- Sowers, G.F. (1973) Settlement of waste disposal fills. *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscou, Vol. 2, pp. 207-210.
- White, D.J., Richards, D.J. and Lock, A.C. (2003) The measurement of landfill settlement using digital imaging and PIV analysis. *Proc. Sardinia 2003, 9<sup>th</sup> International Landfill Symposium*, Cagliari.
- Yen, B.C. and Scanlon, B. (1975) Sanitary landfill settlement rates. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 101, n° 5, pp. 475-487.

## Index général

<b>Mots clé</b>	<b>Page</b>	<b>Mots clé</b>	<b>Page</b>
analyse directe	32-33	modèle de Bjarngard	29, 36
analyse inverse	32-34, 58	modèle de Ling	29, 54
angle de frottement	27	modèle de Sowers	29, 36-37
argile	3,10-11, 43	pénétrromètre	27
bioréacteur	38-39	perméabilité	6, 11, 27, 38, 42, 43
broyage	4, 37, 52	photogrammétrie	16-17, 24
campagne topo	32-33	piggy-backing	9, 12, 19, 40
capacité de stockage	3, 6, 24, 28, 32, 35, 38, 40	plaque	14, 19-24, 27, 45
capteur	18-19	porosité	6-7, 11, 27-28, 40-41
cisaillement	27, 44-45	poussée des terres	27
classification	4-5	pressiomètre	27
cohésion	21, 27, 38, 44	prétraitement	4, 25, 37-38, 46, 52
compactage	7, 10-13, 22-23, 26-27, 30, 38, 40-43	profilomètre	14-15, 18-19, 23-24, 41-42
consolidation	11, 36-37, 39, 46	rechargement	29, 39-40
critère	4, 39, 41-44, 48	renforcement	38
dégradation	3-5, 8, 10-11, 14, 24, 27, 30-31, 38, 41	rupture	12, 27, 40, 43-45
densité	4, 7, 12-13, 18, 25-27, 38, 43	scanner laser 3D	14, 17-18, 26
distorsion	10, 41-43	sondage carotté	26
élasticité	7, 27, 41	stabilité	3, 27, 38, 44, 46
équilibre limite	44	station totale	14
excavation à la pelle	25-26	talus	3, 12-13, 22-25, 27, 42-44, 46
extensomètre	22-24, 45	tamissage	10, 30
fluage	8, 10, 44, 54	tassement différentiel	3, 11-12, 15, 18, 26, 28, 38, 40
géomembrane	12, 43	tassement primaire	10-12, 18, 23, 30-33, 36, 39, 53, 55-58
géosynthétique	12, 43	tassement secondaire	10-12, 21, 30-31, 39, 53-54, 56-58
GPS	18, 24, 26	tassomètre	19-20, 22-24
inclinomètre	15, 23, 45	teneur en eau	6-7, 27-28, 38, 40-41, 43
méthanisation	37, 52	vélocimétrie	16, 18
Modecom	26	vide de fouille	28, 33, 35
modèle d'Asaoka	29, 53-54		

**Annexe 1.**  
**Questionnaire relatif à l'application du modèle ISPM**  
**à l'attention des exploitants de CSD**  
**(Document Lirigm)**

- Appellation et adresse complète du CSD :
- Noms des responsables :
  - ↳ Directeur :
  - ↳ Chargé d'exploitation :
- Contact :
  - ↳ ☎ fixe : ↳ Fax :
  - ↳ ☎ portable : ↳ Email :

➤ **Introduction**

☞ *Répertorier dans un tableau analogue à celui ci-dessous les alvéoles exploitées pour lesquelles vous avez entrepris un suivi des tassements (sous la forme d'un maillage de repères fixes) et vous disposez des informations suivantes :*

- *dates de début et de fin d'exploitation (remplissage en déchet) ;*
- *hauteur de déchets stockés ;*
- *composition des déchets.*

Zone d'exploitation		Suivi topographique post-exploitation			
Casier n°	Alvéole n°	Date du levé initial	Date du dernier levé	Nombre de levés sur la période	Nombres de repères
1	1				
...					
...					

➤ **Géométrie des alvéoles de stockage suivies en tassement**

☞ *Merci de joindre une copie des 2 plans suivants (avec les altitudes répertoriées bien lisiblement) :*

1. Plan général avant exploitation faisant apparaître pour chacune des alvéoles les cotes fond de forme et terrain naturel (TN) ;
2. Plan général de chacune des alvéoles juste après la fin d'exploitation faisant apparaître pour chacune d'entre elles les cotes finales (avec ou sans couverture).

☞ *A défaut, merci de communiquer les coordonnées du géomètre responsable des levés.*

➤ **Suivi des tassements par levés topographiques**

☞ Pour chacune des alvéoles ayant fait ou faisant présentement l'objet d'un suivi topographique de surface, joindre un plan de localisation (ou maillage) répertoriant les différents repères topographiques installés (piquets de bois, bornes en béton, etc.).

☞ Par ailleurs, joindre pour chaque série de repères un tableau provenant du géomètre (de préférence au format Excel : voir ci-dessous) répertoriant les coordonnées précises ( $x_0, y_0, z_0$ ) du maillage initial et l'évolution des tassements au cours du temps. A défaut, merci de noter les coordonnées du géomètre en charge des levés.

Casier :				Alvéole :			
Repère n°	$x_0$	$y_0$	$z_0$ (jj/mm/aa) Mesure 0	$z_1$ (jj/mm/aa) Mesure 1	$z_2$ (jj/mm/aa) Mesure 2	...	$z_{ult}$ (jj/mm/aa) Mesure ultime
1							
2							
...							
n							

➤ **Mise en oeuvre et compactage**

☞ Remplissage par couche sur toute la surface de l'alvéole :      oui      /      non

☞ Si oui, épaisseur moyenne des couches de déchet :       $e_p \sim$       cm

☞ Caractéristiques des compacteurs, poids propre et type de roues utilisées :

Compacteur n°	Marque et référence	Masse (tonnes)	Type des roues
1			
2			

☞ Nombre de passes (1 passe = 1 aller simple) par couche de déchet (en moyenne) :

☞ Densité initiale du déchet après compactage (facultatif) :      (valeur approchée)

➤ **Historique de remplissage des alvéoles et composition des déchets**

☞ Pour chaque alvéole répertoriée en Introduction, merci de remplir la fiche de renseignement individualisée ci-jointe relative à l'historique de remplissage et à la composition des déchets.

☞ Photocopier l'original de la fiche au préalable de manière à disposer d'une fiche par alvéole.

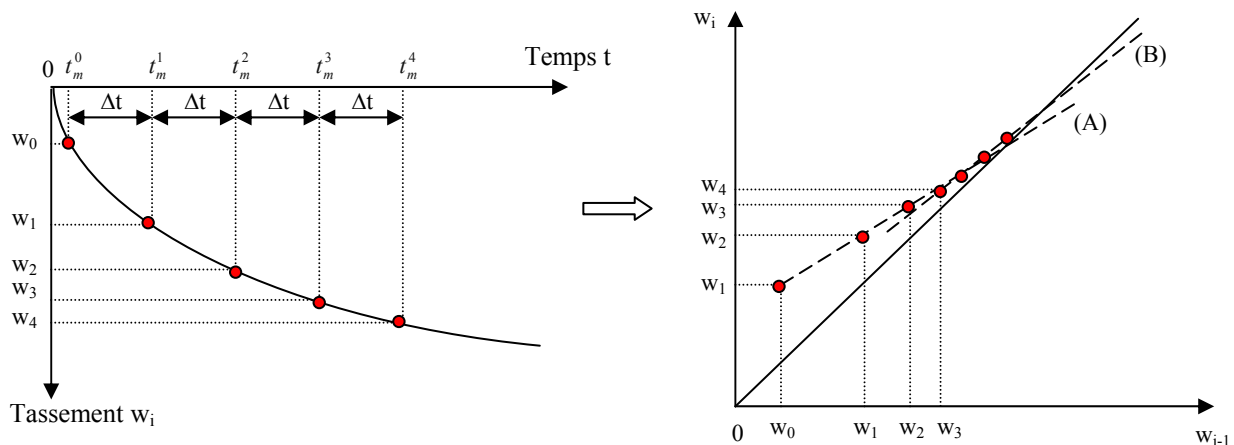
<b>Casier n° :</b>	<b>Alvéole n° :</b>
<b>➤ Historique de remplissage</b>	
1. Date de début d'exploitation (correspondant à la pose de la première couche de déchet) ? ↳ t <sub>début</sub> = (jj/mm/aa)	
2. Date de fin d'exploitation (correspondant au compactage de la dernière couche de déchet) ? ↳ t <sub>fin</sub> = (jj/mm/aa)	
3. Le remplissage de l'alvéole a-t-il subi des périodes d'arrêt supérieures à 15 jours ? ↳ oui / non ↳ Le remplissage a-t-il été combiné (simultanément) avec le remplissage d'une autre alvéole ?	
4. Pose de la couverture finale ↳ Préciser la date de fin de pose de la couverture finale ainsi que son épaisseur <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fin = (jj/mm/aa)</li> <li>• Epaisseur = (cm)</li> </ul>	
<b>➤ Caractéristiques des déchets</b>	
1. Composition des déchets ↳ Répertorier les différents types de déchet stocké dans l'alvéole ainsi que la composition pondérale (%) relative à chacune des fractions.	
Nature du déchet	Composition pondérale (%)
OM DIB1 (essentiellement dégradable) DIB2 (essentiellement effondrable) DIB3 (essentiellement inerte) Encombrants Refus de tri Refus de compostage Déchets verts Boues Compost Mâchefers / terre polluée Déchets inertes / déchets de construction / bois Autre : _____	
2. Caractérisation complémentaire du déchet (cocher les cases correspondantes)	
- Granulométrie du déchet : <input type="checkbox"/> très grossière <input type="checkbox"/> assez grossière <input type="checkbox"/> assez fine <input type="checkbox"/> très fine	
- Prétraitement mécanique : <input type="checkbox"/> aucun <input type="checkbox"/> broyage léger <input type="checkbox"/> broyage intensif	
- Prétraitement biologique : <input type="checkbox"/> aucun <input type="checkbox"/> aération forcée <input type="checkbox"/> méthanisation	
- Etat hydrique initial du déchet : <input type="checkbox"/> peu humide <input type="checkbox"/> assez humide <input type="checkbox"/> très humide	
- Gestion hydrique de l'alvéole : <input type="checkbox"/> faible apport d'eau <input type="checkbox"/> apport d'eau modéré <input type="checkbox"/> apport d'eau important	

## Annexe 2. Prédiction des tassements des déchets par méthode graphique : application aux sites orphelins

En présence de sites de stockage pour lesquels la hauteur de déchet initiale et/ou l'historique d'exploitation ne peuvent pas toujours être déterminées (anciennes décharges, sites orphelins), seul un traitement graphique 'en aveugle' des données de tassement est envisageable. Basées sur l'analyse de portions de courbes expérimentales, plusieurs méthodes autorisent des prédictions à partir de n'importe quel instant initial retardé après la fin d'exploitation. Deux d'entre elles sont présentées ci-dessous.

### ➤ Annexe 2.1. Prédiction par traitement exponentiel : modèle d'Asaoka (1978)

Asaoka (1978) a proposé une procédure de détermination géométrique du tassement final de sols compressibles, correspondant à une loi du type  $w(t) = A.[1 - e^{-\lambda t}]$ . Popularisée en France par Magnan et Deroy (1980), cette méthode est fondée sur une représentation graphique modifiée des tassements mesurés à des intervalles de temps réguliers  $\{t_m^i = t_m^0 + i\Delta t\}_{i=1, 2, \dots}$ . Ces tassements  $w_i = w(t_i)$  tirés de la courbe de compression discrétisée d'un déchet (assimilable à un sol compressible) sont reportés sur le diagramme de la Figure 42 (b) sous la forme  $w_i = f(w_{i-1})$ .



**Figure 42.** (a) Discretisation de la courbe de compression du déchet (b) Construction géométrique d'Asaoka

On trace deux droites (A) et (B) correspondant respectivement au tassement primaire et au tassement secondaire du déchet. L'intersection de la droite (A) avec la 1<sup>ère</sup> bissectrice ( $w_i = w_{i-1}$ ) est censé fournir le tassement primaire final  $(w_p)_\infty$ . De la même manière, l'intersection de la droite (B) avec la 1<sup>ère</sup> bissectrice fournit le tassement total primaire + secondaire  $[(w_p)_\infty + (w_s)_\infty]$  à un temps infini.

Dans le cas d'un chargement par étapes successives, plusieurs séries de droites (A) et (B), approximativement parallèles entre elles, peuvent être tracées. En règle générale cependant, la phase de compression primaire est très courte (pas de surpressions d'eau) voire inexistante dans le cas d'un suivi topographique légèrement retardé à l'issue de la fin d'exploitation.

Dans la pratique, Asaoka (1978) préconise la sélection d'un intervalle de temps  $\Delta t$  compris entre 30 et 100 jours (1 à 3 mois). Toutefois, la méthode présente une restriction majeure qui tient à la nécessité de conserver des intervalles de temps égaux, ce qui compte tenu des impératifs de terrain, est assez difficile à satisfaire au cours d'une longue période de temps.

➤ **Annexe 2.2. Prédiction par traitement hyperbolique : modèle de Ling et al. (1998)**

Exploitant les données tirées de 3 CSD (Sprada, Southeastern Wisconsin et Meruelo), Ling et al. (1998) ont adopté une approche résolument empirique de prédiction des tassements secondaires (post-exploitation) sur la base d'une loi hyperbolique de fluage de la forme suivante :

$$[6] \quad \Delta w(t) = \frac{t - t_m^0}{\frac{1}{\tau_0} + \frac{t - t_m^0}{\Delta w_{ult}}}$$

avec :

$t_m^0$  : temps de début du suivi topographique

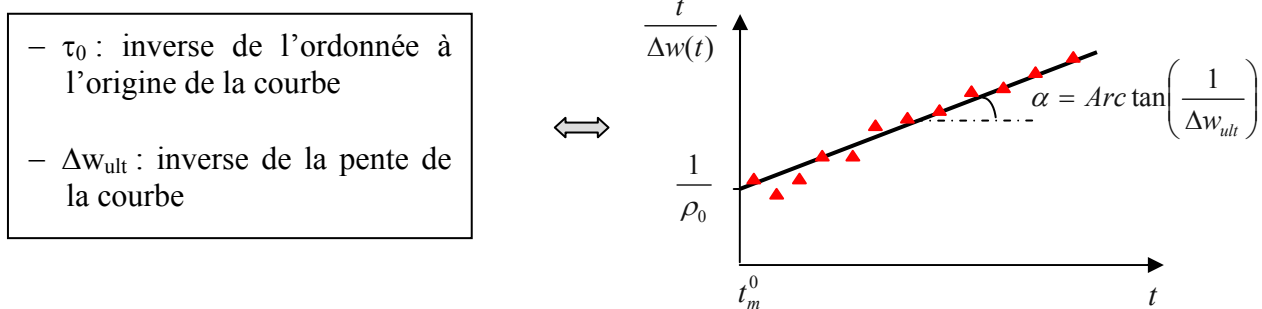
$\Delta w(t)$  : tassement correspondant à l'intervalle de temps de  $t_m^0$  à  $t$

$\tau_0$  : taux de tassement initial (i.e. quand  $t \cong t_m^0$ )

$\Delta w_{ult}$  : tassement de la colonne de déchet de  $t_m^0$  au temps infini (i.e. quand  $t \rightarrow \infty$ )

Lorsque le suivi topographique est entrepris immédiatement après la pose de la couverture finale, l'expression du modèle se simplifie avec  $t_m^0 = t_c$  et  $\Delta w = w$ .

Ainsi que représenté sur la Figure 43, le tracé de la courbe représentative de la fonction  $t - t_m^0 / \Delta w(t) = f(t)$  fournit d'après les auteurs une droite dont la pente permet de déduire :



**Figure 43.** Détermination graphique des paramètres constitutifs de la loi de Ling et al. (1998)

Le temps nécessaire pour atteindre 95 % du tassement ultime est égal à  $t_f = 19 \Delta w_{ult} / \rho_0$ .

Contrairement à ce qu'indiquent les auteurs, une analyse de ce modèle à partir de données de terrain issues de plusieurs CSD français (Olivier, 2003) a montré qu'il sous-estimait l'évolution des tassements à long terme. Son utilisation est donc sujette à caution.



### Annexe 3.

## Algorithme du Modèle Incremental de Prédiction des Tassements (modèle ISPM) à l'attention des bureaux d'étude

Cette annexe complète la présentation faite au Chapitre 3 (§ 3.3) du Modèle Incremental de Prédiction des Tassements (modèle ISPM) développé à l'Université de Grenoble. Elle apporte les éléments nécessaires au développement d'un tableur de prédiction des tassements. Une présentation plus complète (Olivier, 2003) est accessible par téléchargement sur [www.lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/folivier.html](http://www.lirigm.ujf-grenoble.fr/Laboratoire/Personnel/folivier.html).

#### ➤ Principales hypothèses du modèle

Assimilant une colonne de déchet à un empilement de n couches horizontales, le modèle fonctionne à partir des hypothèses générales suivantes (Tableau 7).

**Tableau 7.** Principales hypothèses du modèle ISPM

Aspect	Hypothèses retenues
➤ Historique	- L'origine des temps (t = 0) coïncide avec la date de début de construction de la colonne (i.e. mise en place de la première couche).
➤ Géométrie	- La colonne est supposée située hors de la zone d'influence des bords du casier et sa hauteur est petite en comparaison de la largeur du casier de sorte que les déplacements horizontaux peuvent être négligés.
➤ Déchet	- Les hauteurs initiales $h_0$ et les poids volumiques initiaux $\gamma_0$ après mise en place (compactage inclus) sont identiques pour chacune des couches. - Le déchet est supposé non saturé à tout instant. - La dégradation est supposée aboutir à une perte de masse totale (fluide compris) limitée sur la période d'étude de sorte qu'elle n'influe pas sur l'évolution du poids volumique des déchets
➤ Compactage	- Le compactage est supposé n'affecter que la couche supérieure de déchet du fait de la rapide dispersion latérale des contraintes avec la profondeur. - La contrainte de préconsolidation du déchet résultant du compactage est supposée identique pour toutes les couches. - Le tassement immédiat relatif à l'épandage et au compactage des déchets (juste après déversement) n'est pas intégré dans la modélisation des tassements. Cela s'explique par la prise en compte d'un poids volumique initial $\gamma_0$ déterminé après compactage.
➤ Sol et couvertures	- Le tassement du sol de fondation est considéré comme négligeable. - Les couvertures journalières ne sont pas prises en compte dans la modélisation. - La couverture finale est supposée incompressible à tout instant.

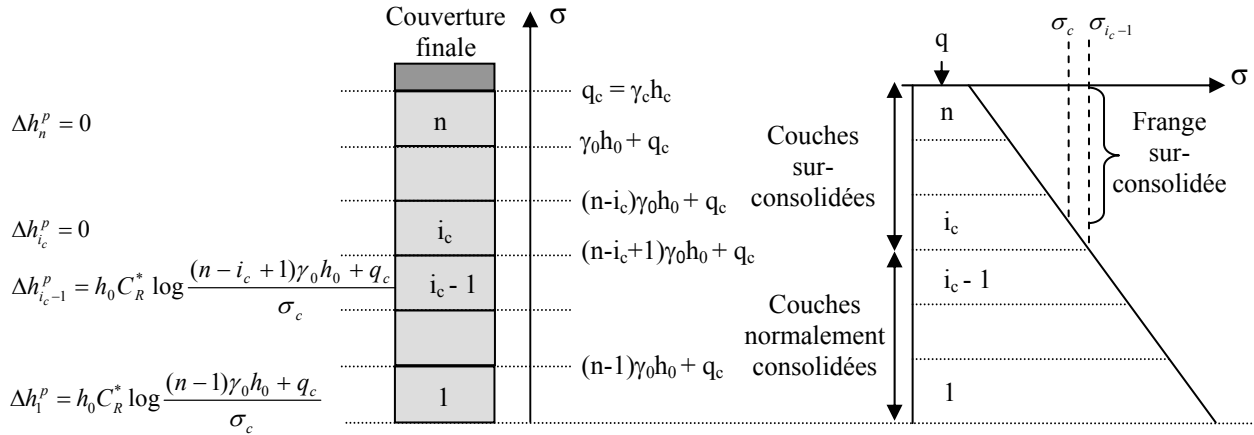
#### ➤ Expression du tassement primaire d'une colonne de déchet

Soit une colonne de déchet composée de n couches en fin d'exploitation. La contrainte verticale agissant sur la couche i correspond au poids propre des couches sus-jacentes et de la couverture soit :

$$[7] \quad \sigma_i = (n-i)\gamma_0 h_0 + \gamma_c h_c$$

où  $\gamma_c h_c$  (noté ultérieurement  $q_c$ ) représente la contrainte verticale induite par le poids propre de la couverture.

Compte tenu de la contrainte de préconsolidation  $\sigma_c$  induite par le compactage, les couches élémentaires subissant une contrainte verticale  $\sigma < \sigma_c$  sont supposées surconsolidées et leur tassement primaire est considéré nul. Le tassement primaire concerne donc exclusivement les couches d'indice  $i$  telles que  $\sigma_i > \sigma_c$ , soit si l'on se réfère à l'équation [7] aux couches satisfaisant à l'inégalité  $i < n - \frac{\sigma_c - q_c}{\gamma h_0}$ . Si l'on définit  $i_c = ENT\left(n - \frac{\sigma_c - q_c}{\gamma h_0}\right)$  comme rang critique de surconsolidation, on obtient :  $\Delta h_i^p = 0, \forall i \in [i_c, \dots, n]$ . Pour  $i < i_c$ , les expressions  $\Delta h_i^p$  tirées des équations [1] et [2] (§ 3.3.1) sont illustrées sur la Figure 44.



**Figure 44.** Expressions du tassement primaire pour les couches élémentaires d'indice 1 à n

Considérant un coefficient de compression primaire  $C_R^*$  identique pour chacune des couches de déchet, on obtient l'expression du tassement primaire ( $w_n^p$ ) de la colonne par sommation des expressions de  $\Delta h_i^p$  pour  $i$  variant de 1 à  $i_c - 1$ , soit :

$$[8] \quad w_n^p = \sum_{i=1}^{i_c-1} \Delta h_i^p = h_0 C_R^* X \quad \text{avec} \quad X = \log \frac{\prod_{i=1}^{i_c-1} ((n-i)\gamma_0 h_0 + q_c)}{(\sigma_c)^{i_c-1}}$$

### ➤ **Expression du tassement secondaire de la colonne**

Le temps absolu ( $t$ ) a pour origine le temps de début d'exploitation de la colonne de déchet. On peut l'exprimer en fonction du temps relatif  $\tau$  (pris à partir du début d'exploitation de la couche sommitale), des temps d'exploitation ( $\tau_j$ ) et des temps de repos ( $\tau_{rj}$ ) de chacune des couches inférieures,  $\tau_{rj}$  correspondant à une période d'arrêt intercalée entre la mise en place des couches  $j$  et  $j+1$  ( $\tau_{rj} \neq 0$  uniquement en cas de discontinuité franche entre deux couches successives). Cela donne pour la couche d'indice  $i$ :

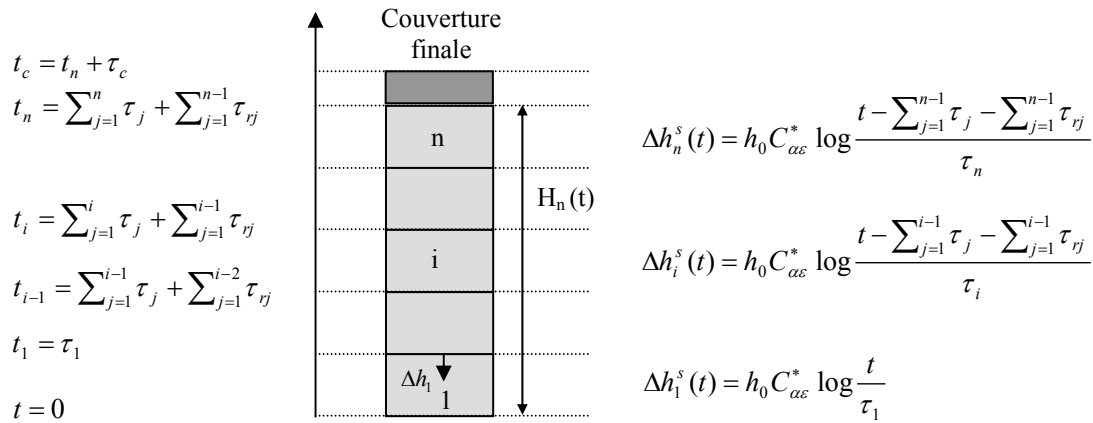
$$[9] \quad t = \sum_{j=1}^{i-1} \tau_j + \sum_{j=1}^{i-1} \tau_{rj} + \tau$$

A partir de l'équation [9], on est en mesure de déduire les valeurs de  $t_i$  et  $t_c$ , correspondant respectivement à la fin d'exploitation de la couche  $i$  et la fin d'exploitation de la colonne complète (couverture incluse). Rappelons que  $\tau_c$  représente le temps d'installation de la couverture.

$$[10] \quad t_i = \sum_{j=1}^i \tau_j + \sum_{j=1}^{i-1} \tau_{rj}$$

$$[11] \quad t_c = t_n + \tau_{rn} + \tau_c = \sum_{j=1}^n \tau_j + \sum_{i=1}^n \tau_{rj} + \tau_c$$

En exprimant l'équation fondamentale du tassement secondaire [3] (§ 3.3.1) en fonction du temps absolu  $t$ , on tire les expressions du tassement secondaire des couches 1 à  $n$  ainsi que représenté sur la Figure 45.



**Figure 45.** Expressions du tassement secondaire pour les couches élémentaires d'indice 1 à  $n$

Considérant un coefficient de compression secondaire  $C_{\alpha\epsilon}^*$  identique pour chacune des couches, on obtient l'expression du tassement secondaire  $w_n^s(t)$  de la colonne de déchet par addition des contributions  $\Delta h_i^s$  des couches d'indice 1 à  $n$  :

$$[12] \quad w_n^s(t) = \sum_{i=1}^n \Delta h_i^s(t) = h_0 C_{\alpha\epsilon}^* Y(t) \quad \text{avec} \quad Y(t) = \log \left\{ \frac{t \prod_{i=1}^{n-1} (t - \sum_{j=1}^i \tau_j - \sum_{j=1}^i \tau_{rj})}{\prod_{i=1}^n \tau_i} \right\} \quad \text{pour } t > t_n$$

### ➤ **Expression du tassement (de surface) post-exploitation**

Le tassement primaire d'une colonne de déchet étant supposé achevé en fin d'exploitation ( $t \geq t_c$ ), le tassement post-exploitation  $w(t)$  (mesuré à l'aide de repères de surface) peut être assimilé à un tassement exclusivement secondaire égal à :

$$[13] \quad w(t) = w_n^s(t) - w_n^s(t_c) = h_0 C_{\alpha\epsilon}^* [Y(t) - Y(t_c)] = h_0 C_{\alpha\epsilon}^* \log \left\{ \frac{t \prod_{i=1}^{n-1} (t - \sum_{j=1}^i \tau_j - \sum_{j=1}^i \tau_{rj})}{t_c \prod_{i=1}^{n-1} (t_c - \sum_{j=1}^i \tau_j - \sum_{j=1}^i \tau_{rj})} \right\} \quad \text{pour } t \geq t_c$$

#### Remarque n°1 :

Dans la pratique, les durées d'exploitation des couches de déchet ne sont pas toujours connues dans le détail par l'exploitant. En l'absence d'information tangible sur l'historique d'exploitation, un temps d'exploitation moyen par couche  $\tau$  ( $= t_n/n$ ) pourra être considéré à la place des temps d'exploitation  $\tau_i$  et des temps de repos  $\tau_{ri}$  à condition toutefois que la vitesse de montée du remblai de déchet n'ait pas trop fluctué. On simplifie de manière significative l'expression de l'équation [13] en écrivant  $Y(t)$  sous la forme suivante :

$$[14] \quad Y(t) = \log \left[ \prod_{j=0}^{n-1} (t/\tau) - j \right]$$

#### Remarque n°2 :

Si pour une raison quelconque le suivi topographique est retardé après l'installation de la couverture, le tassement effectivement mesuré en surface n'est plus équivalent au tassement post-exploitation  $w(t)$ . Supposons que la première mesure topographique de surface soit réalisée au temps  $t_m^0 > t_c$ , le tassement mesuré équivaut alors à :

$$[15] \quad \Delta w(t) = w(t) - w(t_m^0) = w_n^s(t) - w_n^s(t_m^0)$$

➤ **Récapitulatif des paramètres du modèle ISPM et mode d'estimation par analyse inverse**

L'application du modèle ISPM par analyse inverse consiste à déterminer les valeurs de  $C_{ae}^*$  à partir de données de tassement  $w(t_m)$  tirées de mesures de terrain. Dans le cas des CSD modernes, la plupart des paramètres de la loi de tassement peuvent être calculés à partir des informations disponibles auprès des exploitants et en fixant certains paramètres ayant une influence limitée (tels  $C_R^*$  et  $\sigma_c$ ) par approximation (Tableau 8).

**Tableau 8.** Synthèse des paramètres du modèle ISPM et mode d'estimation

Catégorie	Paramètre	Symbole	Unité	Mode d'estimation
➤ Paramètres géométriques	- nombre de couches	$n$	-	Analyse inverse
	- épaisseur initiale d'une couche	$h_0$	m	Exploitant
	- hauteur de déchet au temps $t_c$	$H_n(t_c)$	m	Exploitant
➤ Paramètres de temps	- durées d'exploitation	$\tau_i$	mois	Exploitant
	- durées d'arrêt d'exploitation	$\tau_{ri}$	mois	Exploitant
	- temps d'exploitation totale	$t_c$	mois	Exploitant
	- temps de mesure	$t_m^0, t_m, t_m^{ult}$	mois	Géomètre
➤ Paramètres relatifs au chargement du déchet	- poids vol. initial du déchet	$\gamma_0$	kN/m <sup>3</sup>	Supposé ou mesuré
	- contrainte de compactage	$\sigma_c$	kPa	Pré-calibré ( $\cong 40$ kPa)
	- surcharge due à la couverture	$q_c$	kPa	Exploitant
➤ Paramètres relatifs à la compressibilité du déchet	- coeff. de compression primaire	$C_R^*$	-	Pré-calibré ( $\cong 0,20$ )
	- coeff. de compression secondaire	$C_{ae}^*$	-	Analyse inverse
	- tassement post-exploitation	$w(t_m)$	m	Géomètre

L'analyse inverse consiste à évaluer la valeur du coefficient de compression secondaire intrinsèque  $C_{ae}^*$  à partir de mesures de tassement. Pour cela, on considère l'expression de la déformation post-exploitation  $\varepsilon(t)$  (moyennée sur la colonne) égale au rapport du tassement de surface  $w(t)$  sur la hauteur de déchets  $H_n$  (couverture exclue) considérée en général au temps  $t_c$  :

$$[16] \quad \varepsilon(t) = w(t)/H_n(t_c) \text{ avec : } H_n(t_c) = nh_0 - w_n^p - w_n^s(t_c)$$

A partir des équations [8], [12] et [16], on est en mesure d'exprimer  $C_{ae}^*$  :

$$[17] \quad C_{ae}^*(t) = \frac{\varepsilon(t)(n - C_R^*X)}{Y(t) - Y(t_c)[1 - \varepsilon(t)]}$$

La résolution du système précédent (par approximations successives sur  $h_0$ ) à chaque temps de mesure  $t_m^0, t_m, t_m^{ult}$  fournit autant de valeurs de  $C_{ae}^*$ . Dans la majorité des cas,  $C_{ae}^*(t_m)$  converge rapidement de sorte qu'il est possible de considérer une valeur finale stabilisée, prise comme valeur intrinsèque du coefficient de compression secondaire.



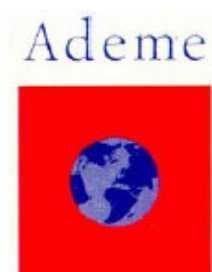
# **Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de classe II (Déchets ménagers et assimilés)**

## **Résumé**

Les Centres de Stockage de Déchets (CSD) deviennent des ouvrages de plus en plus techniques au sein desquels interagissent des matériaux naturels (argile, sable), des matériaux artificiels (géosynthétiques) et les déchets dont le comportement est variable à la fois dans le temps et dans l'espace. Ces ouvrages requièrent un suivi rigoureux, en particulier en ce qui concerne le comportement géotechnique. Les enjeux liés au contrôle et à la prédiction des tassements sont à la fois d'ordre sécuritaire (pérennité des couvertures sous l'effet des tassements différentiels, stabilité des talus, interactions déchets - structures) et économique (prévision de la capacité de stockage ultime, optimisation de la hauteur et de la durée d'exploitation).

Eu égard à ces enjeux importants, la problématique 'tassements' demeure cependant trop souvent peu prise en compte par les exploitants de CSD et les bureaux d'étude. Les tassements sont de fait souvent mesurés mais pratiquement jamais exploités alors qu'ils constituent de surcroît des indicateurs de premier ordre de l'évolution de l'état du déchet. Partant de ce constat, ce guide illustre les enjeux du suivi des tassements, apporte aux exploitants des éléments techniques relatifs à l'instrumentation des sites et met à disposition des outils méthodologiques en vue de la mise en valeur des données de terrain (organisation des campagnes de mesure, calibration de modèles de prédiction), permettant ainsi d'orienter le suivi des CSD dans le sens d'une meilleure anticipation des tassements à long terme.

**Direction Déchets et Sols**



**Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie**

**Siège social – 2, square La Fayette – BP 90406**

**49004 Angers Cedex 01**

**Téléphone : 02 41 20 41 20 – Télécopie : 02 41 87 23 50**

**[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)**