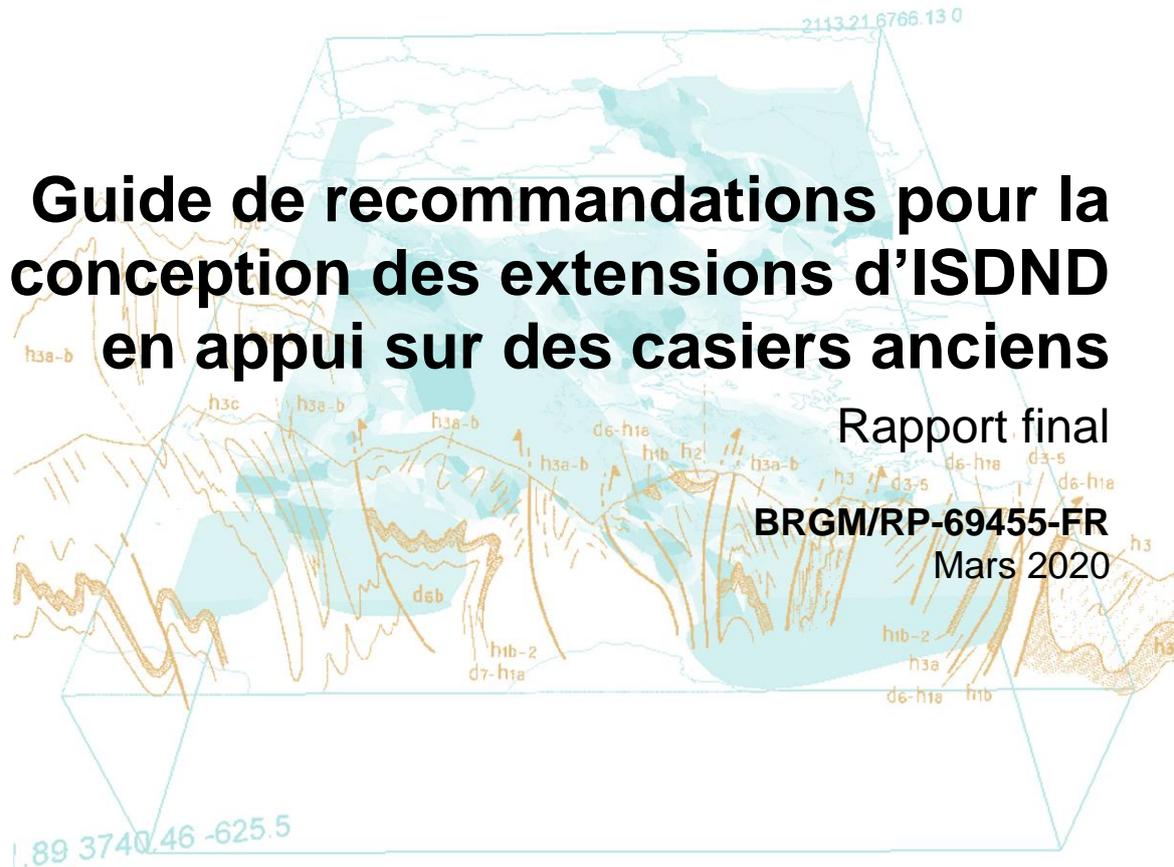


Document public



# Guide de recommandations pour la conception des extensions d'ISDND en appui sur des casiers anciens

Rapport final

BRGM/RP-69455-FR

Mars 2020



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Guide de recommandations pour la conception des extensions d'ISDND en appui sur des casiers anciens

Rapport final

**BRGM/RP-69455-FR**  
Mars 2020

**B. Chevrier**

Avec la collaboration du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (Bureau de la Planification et de la Gestion des Déchets) et du Groupe de Travail sur les installations de stockage de déchets.

**Vérificateur :**

Nom : P. Michel

Fonction : Correspondante appui aux politiques publiques – domaine environnement (Direction DEPA)

Date : 02/03/2020

Signature :



**Approbateur :**

Nom : F. Garrido

Fonction : Directeur adjoint, Directeur Eau, Environnement, Procédés et Analyses

Date : 06/03/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

Le présent guide a été élaboré, à la demande du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, par un groupe de travail composé de :

- du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) : Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) - Bureau de la Planification et de la Gestion des Déchets (BPGD) ;
- AFITEX ;
- AMORCE ;
- ANTEAGROUP ;
- ARCADIS ;
- BRGM ;
- BURGEAP ;
- CHASSAGNAC CONSEILS ;
- DRIEE ;
- DSC ;
- ECOGEOS ;
- EODD ;
- FNADE ;
- FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT ;
- HUESKER ;
- INERIS ;
- INFRAG ;
- INOVYN ;
- IRSTEA ;
- LOW&BONAR ;
- METED\_K ;
- NAUE ;
- PAPREC ;
- PIZZORNO ;
- ROBIN DES BOIS ;
- RAZEL-BEC FAYAT ;
- SAFEGE ;
- GROUPE SECHE ;
- SUEZ ENVIRONNEMENT ;
- TEXINOV ;
- VEOLIA.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Chevrier B.** (2020) - Guide de recommandations pour la conception des extensions d'ISDND en appui sur des casiers anciens. BRGM/RP-69455-FR, 81 p., 22 fig., 11 tab., 2 ann.

# Sommaire

<b>1. Lexique</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Contexte et objectifs</b> .....	<b>11</b>
<b>3. Typologie et points clés d'un projet d'extension</b> .....	<b>13</b>
3.1. TYPOLOGIE DES PROJETS D'EXTENSION EN APPUI .....	13
3.2. LES POINTS CLÉS D'UN PROJET D'EXTENSION .....	15
<b>4. Analyse de l'existant</b> .....	<b>17</b>
4.1. PRÉREQUIS : CONNAISSANCE PRÉALABLE DU SITE .....	17
4.1.1. Contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique.....	17
4.1.2. Géométrie des casiers existants .....	17
4.1.3. Le massif de déchets existant.....	18
4.1.4. Couverture du massif existant.....	19
4.1.5. Dispositifs existants de gestion des fluides .....	19
4.1.6. Synthèse des données nécessaires.....	20
4.2. ESTIMATION DES TASSEMENTS DU MASSIF.....	21
4.2.1. Origine et nature des tassements .....	21
4.2.2. Ordre de grandeur des tassements.....	24
4.2.3. Impact des tassements sur les éléments fonctionnels des casiers de déchets.....	25
4.2.4. Évaluation des tassements par modélisation .....	25
<b>5. Conception</b> .....	<b>29</b>
5.1. COUCHE DE FORME.....	29
5.1.1. Fonctions et objectifs .....	29
5.1.2. Préparation des déchets .....	29
5.1.3. Matériaux et structure de la couche de forme .....	31
5.1.4. Renforcement de la couche de forme .....	31
5.2. BARRIÈRE D'ÉTANCHÉITÉ PASSIVE.....	37
5.2.1. Fonction, principe d'équivalence .....	37
5.2.2. Spécificités d'une barrière passive en appui sur des déchets .....	38
5.2.3. Matériaux.....	38
5.3. BARRIÈRE D'ÉTANCHÉITÉ ACTIVE .....	39
5.4. ANCRAGES DES GÉOSYNTHÉTIQUES .....	40
5.4.1. Géosynthétiques de renforcement du support.....	40
5.4.2. Géomembrane, géosynthétique bentonitique et géocomposite de drainage ....	43
5.4.3. Dispositions spéciales d'ancrage .....	43

5.5. GESTION DES FLUIDES .....	46
5.5.1. Casier existant .....	46
5.5.2. Casier en appui.....	47
<b>6. Stabilité et intégrité structurelle .....</b>	<b>49</b>
6.1. TYPES D'INSTABILITÉS À ÉVALUER .....	49
6.1.1. Stabilité générale ou glissement rotationnel.....	49
6.1.2. Stabilité d'interface ou glissement plan .....	49
6.1.3. Stabilité au glissement mixte.....	49
6.1.4. Maintien de l'intégrité du DEG .....	49
6.2. MÉTHODES DE CALCUL DE STABILITÉ .....	50
6.2.1. Méthodes analytiques .....	50
6.2.2. Méthodes numériques .....	51
6.3. ÉLÉMENTS DE CALCUL.....	51
6.3.1. Paramètres de cisaillement des déchets.....	51
6.3.2. Paramètres de cisaillement des interfaces.....	52
6.4. SITUATIONS, SOLLICITATIONS ET COMBINAISONS DE CALCULS .....	54
6.4.1. Situations de calcul .....	54
6.4.2. Sollicitations et combinaisons de calculs.....	55
6.5. EFFORTS ET DÉFORMATIONS INDUITS DANS LES GÉOSYNTHÉTIQUES AR LES DÉCHETS SUS-JACENTS.....	55
6.6. ACTIONS POUR L'AMÉLIORATION DE LA STABILITÉ .....	56
<b>7. Suivi et instrumentation .....</b>	<b>57</b>
7.1. OBJECTIFS DU SUIVI.....	57
7.2. MÉTHODES DE SUIVI DE L'ÉVOLUTION EN GRAND DU MASSIF.....	57
7.3. MÉTHODES DE SUIVI DES DÉFORMATIONS DES BARRIÈRES .....	58
7.3.1. Profilomètres à torpille .....	58
7.3.2. Tassomètres hydrostatiques .....	59
7.3.3. Inclinomètre horizontal à demeure .....	59
7.3.4. Fibres optiques .....	60
7.3.5. Extensomètre magnétiques de forage.....	61
7.4. MÉTHODOLOGIE DE CONTRÔLE .....	62
7.4.1. Implantation des points de contrôle de l'interface.....	62
7.4.2. Fréquence des contrôles.....	62
<b>8. Références citées .....</b>	<b>65</b>

## Listes des figures

Figure 1 : Schéma de principe : extension verticale pure. ....	13
Figure 2 : Schéma de principe : extension en appui latéral. ....	13
Figure 3 : Schéma de principe : extension en appui mixte. ....	14
Figure 4 : Synoptique du processus de conception d'une extension en appui. ....	15
Figure 5 : Évolution de la hauteur d'un casier de stockage au cours du temps. ....	23
Figure 6 : Illustration du profil de tassements à l'interface en fonction de la géométrie du casier support et du casier d'extension. ....	27
Figure 7 : Principe du renforcement par géogrid. ....	33
Figure 8 : Principe de fonctionnement d'une structure renforcée par géogrid lors d'un affaissement de la structure sous-jacente. ....	34
Figure 9 : Digue périphérique d'extension verticale ou sommitale d'un casier avec ancrage de la géogrid sous la digue périphérique. ....	40
Figure 10 : Illustration de l'effet peau de tambour. ....	41
Figure 11 : Extension latérale avec un dispositif d'étanchéité géosynthétique (DEG) et géogrid ancrés en tête et lestés en risberme intermédiaire. ....	41
Figure 12 : Extension latérale avec un dispositif d'étanchéité géosynthétique (DEG) et géogrid ancrés en tête et en risberme intermédiaire. ....	42
Figure 13 : Digue périphérique d'extension verticale ou sommitale d'un casier avec ancrage de la géogrid sous la digue périphérique. ....	42
Figure 14 : Géosynthétique (GSY) à ancrer situé au-dessus de l'interface lisse. ....	43
Figure 15 : Géosynthétique (GSY) à ancrer situé sous l'interface lisse. ....	43
Figure 16 : Ancrage par reconstitution de la crête de talus. ....	44
Figure 17 : Ancrages à plat. ....	44
Figure 18 : Ancrage à plat par retournement du géosynthétique. ....	45
Figure 19 : Ancrage à plat glissant. ....	45
Figure 20 : Ancrage en plan incliné. ....	45
Figure 21 : Instabilités et déformations potentielles d'un projet d'un casier en appui sur des déchets. ....	50
Figure 22 : Exemple de distribution des efforts et déformations le long d'une interface géosynthétique en barrière de fond de casier d'extension. ....	55

## Listes des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des données nécessaires à un projet d'extension en appui sur des déchets anciens. ....	20
Tableau 2 : Impacts possibles des tassements sur les éléments fonctionnels des casiers. ....	25
Tableau 3 : Synthèse des techniques de préparation des déchets. ....	30
Tableau 4 : Synthèse des coefficients partiels à l'ELU. ....	37
Tableau 5 : Quelques valeurs de cohésion et d'angle de frottement des interfaces (tiré de Tano <i>et al.</i> , 2016). ....	53
Tableau 6 : Synthèse des méthodes de suivi en grand de l'évolution géométrique du massif de déchets. ....	58
Tableau 7 : Avantages et inconvénients du profilomètre à torpille. ....	58
Tableau 8 : Avantages et inconvénients du profilomètre des tassomètres hydrostatiques. ....	59
Tableau 9 : Avantages et inconvénients de l'inclinomètre horizontal. ....	59
Tableau 10 : Avantages et inconvénients des fibres optiques. ....	60
Tableau 11 : Avantages et inconvénients des extensomètres de forage. ....	61

## Liste des annexes

Annexe 1 : Compactage dynamique .....	67
Annexe 2 : Dimensionnement du renforcement par géogridde .....	73

## 1. Lexique

**BSA : Barrière de sécurité active** : système d'étanchéité-drainage, constitué typiquement d'un horizon drainant surmontant une géomembrane, permettant le drainage et la collecte des lixiviats

**BSP : Barrière de sécurité passive** : dispositif d'étanchéité, typiquement minéral, situé sous la barrière active, visant à limiter la migration des lixiviats vers le milieu naturel en cas de défaillance de celle-ci

**Casier** : subdivision de la zone de stockage délimitée par une digue périmétrique stable et étanche, hydrauliquement indépendante

**DDAE** : Dossier de Demande d'Autorisation d'Exploiter une ICPE

**DEG** : Dispositif d'étanchéité par géomembrane

**GMB** : géomembrane

**GNT** : Grave Non Traitée

**GSB** : Géosynthétique bentonitique

**GSY** : Géosynthétique

**GTX** : Géotextile

**ICPE** : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

**ISDND** : Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux

**Lixiviats** : Liquide filtrant par percolation dans les déchets et s'écoulant d'un casier ou contenu dans celui-ci.

**PET** : Polyéthylène

**PP** : Polypropylène

**PVA** : Alcool Polyvinylique



## 2. Contexte et objectifs

Le présent guide porte uniquement sur les extensions d'ISDND en appui total ou partiel sur des casiers existants non conformes à la réglementation actuelle et qui nécessitent la mise en place de dispositifs d'étanchéité complémentaires.

Il s'adresse aux exploitants, maîtres d'œuvre et concepteurs, services de l'État et tiers-experts. Il présente, au stade de l'étude et de la conception, les points clés qui doivent nécessairement être abordés dans le cadre d'un projet d'extension d'ISDND en appui sur des déchets et propose des orientations et des méthodes pour les traiter, sans toutefois en faire une liste exhaustive.

L'article 9 de l'Arrêté Ministériel du 15 février 2016 autorise l'extension d'ISDND en appui sur des casiers existants et précise que : « *si les dispositifs d'étanchéité (du casier existant) ne sont pas conformes aux prescriptions du présent arrêté, une barrière d'étanchéité passive conforme doit être mise en place sur le fond et les flancs des nouveaux casiers* ». Cet article mentionne également le recours possible à une solution équivalente pour le dispositif de barrière passive en fond et en flancs du nouveau casier.

La conception et la réalisation d'un dispositif d'étanchéité et de drainage pérenne sur un support tel que des déchets non dangereux, exigent la prise en compte de certaines de leurs spécificités (portance, tassements) et de certaines contraintes techniques qui ne sont habituellement pas envisagées.

En effet, compte tenu des propriétés mécaniques évolutives des déchets, des questions peuvent être posées telles que :

- estimation des tassements primaires des déchets anciens sous la surcharge des casiers en extension ;
- évolution des tassements secondaires des déchets anciens (dus à la dégradation des déchets) ;
- maintien et pérennité des dispositifs de collecte des lixiviats des massifs anciens ;
- influence des tassements sur la pérennité des dispositifs d'étanchéité et de drainage des lixiviats des casiers en extension ;
- conception des dispositifs d'étanchéité et de drainage des lixiviats des casiers de l'extension ;
- stabilité mécanique des massifs rehaussés ;
- suivi de l'évolution de ces massifs.



### 3. Typologie et points clés d'un projet d'extension

#### 3.1. TYPOLOGIE DES PROJETS D'EXTENSION EN APPUI

Les extensions d'ISDND en appui sur des casiers existants peuvent être classées selon trois catégories :

- extension verticale, en appui essentiellement sur le sommet d'un casier existant. Les problématiques principalement rencontrées sur ce type d'extension sont liées à l'intégrité des dispositifs d'étanchéité et de drainage du nouveau casier vis-à-vis des tassements différentiels des déchets anciens, le drainage des lixiviats et des biogaz de ces déchets, la stabilité globale du massif ainsi rehaussé ;

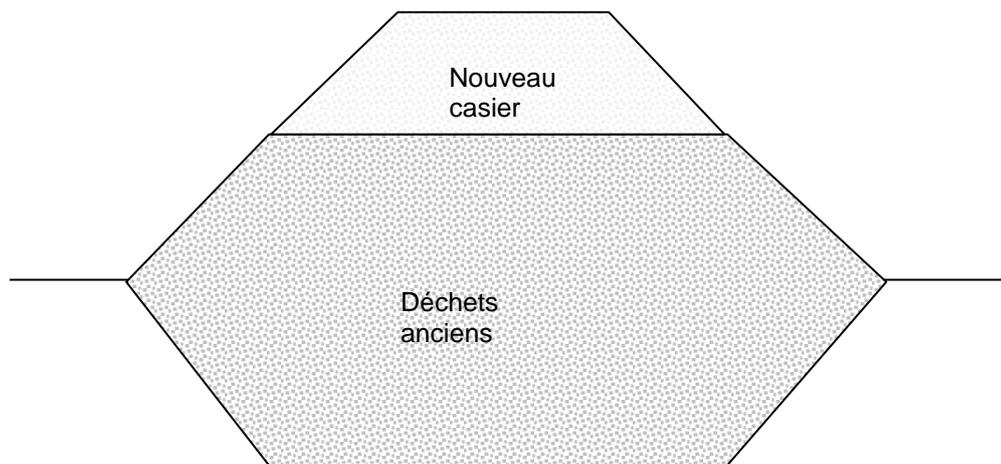


Figure 1 : Schéma de principe : extension verticale pure.

- extension latérale, en appui sur le flanc d'un casier existant et sur le substratum. Les problématiques principalement rencontrées sur ce type d'extension sont liées à l'intégrité des dispositifs d'étanchéité et de drainage vis-à-vis des déformations du massif de déchets anciens, à la transition entre le substratum et les déchets anciens et à la stabilité du nouveau massif ;

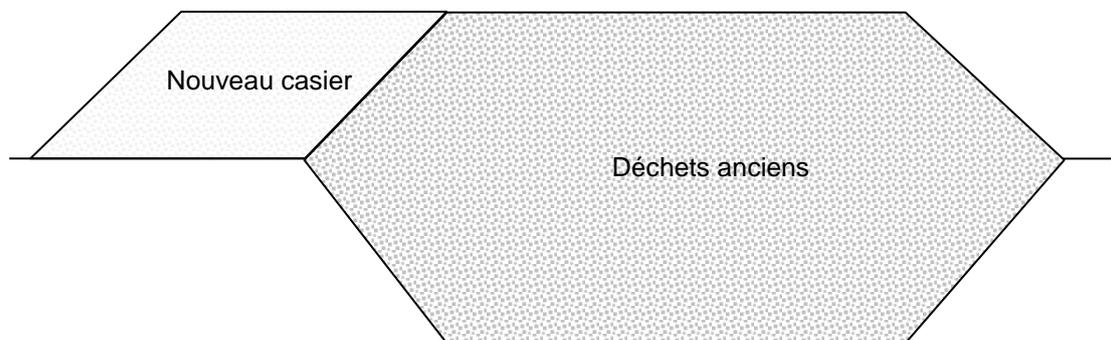
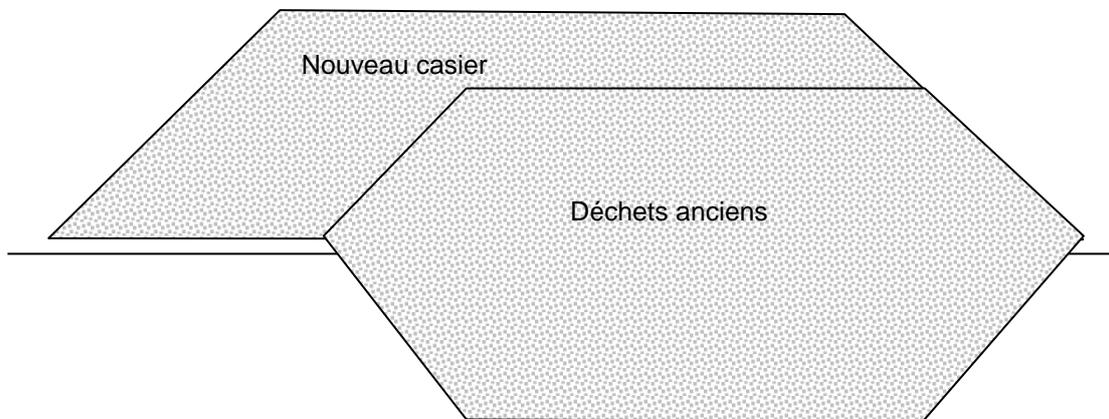


Figure 2 : Schéma de principe : extension en appui latéral.

- extension mixte. Ce type d'extension est concerné par l'ensemble des problématiques évoquées précédemment.



*Figure 3 : Schéma de principe : extension en appui mixte.*

### 3.2. LES POINTS CLÉS D'UN PROJET D'EXTENSION

Dans le cadre d'un projet d'extension d'ISDND en appui sur un casier réglementairement non-conforme, il conviendra d'aborder a minima les points figurant dans le diagramme ci-dessous. Ils sont développés dans la suite du présent guide.

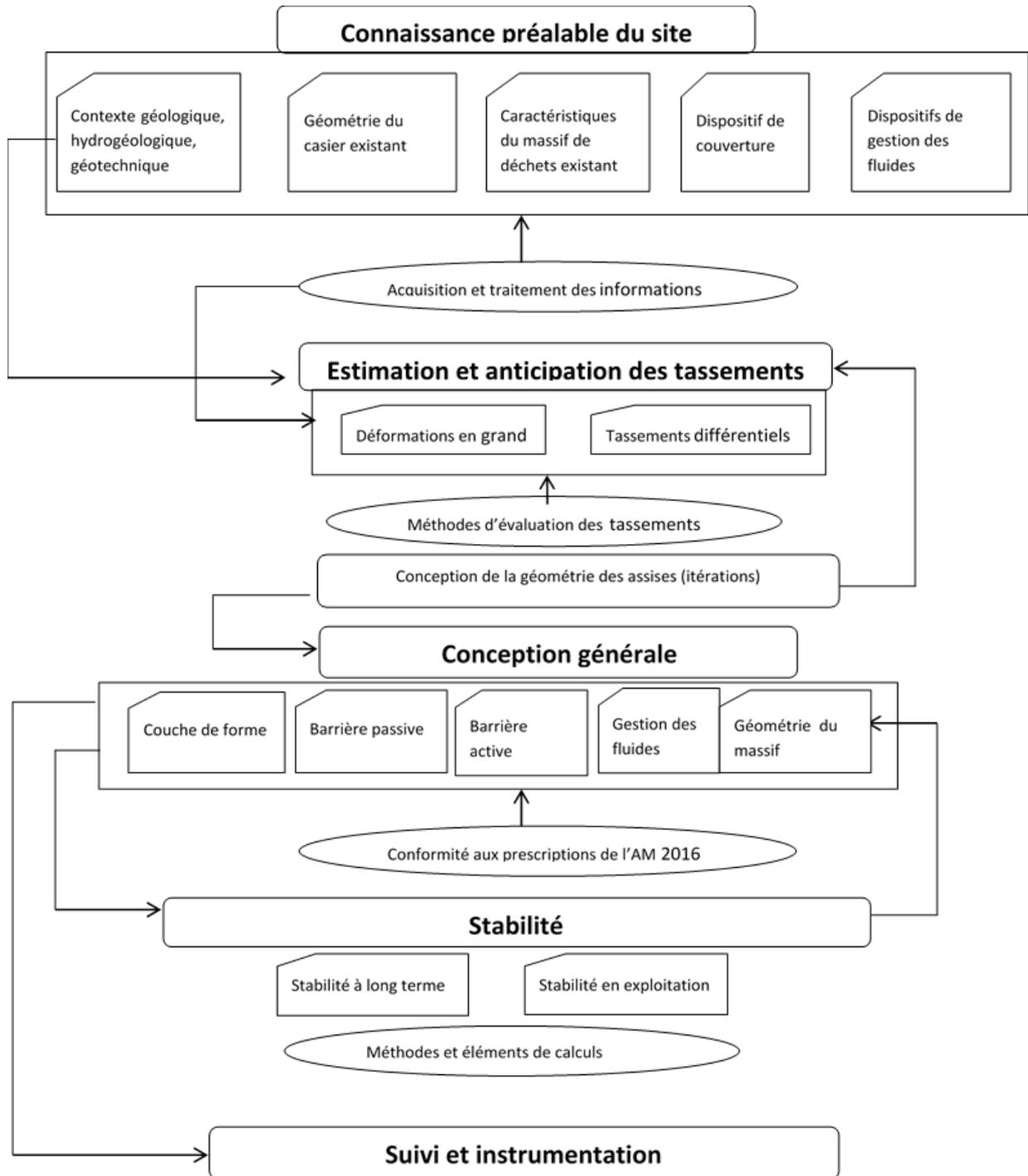


Figure 4 : Synoptique du processus de conception d'une extension en appui.



## 4. Analyse de l'existant

### 4.1. PRÉREQUIS : CONNAISSANCE PRÉALABLE DU SITE

La définition et la conception d'un projet d'extension d'ISDND en appui sur des déchets nécessite une connaissance préalable précise du site, notamment la géométrie, l'historique et la typologie des déchets stockés dans le casier support.

#### 4.1.1. Contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique

La caractérisation spécifique du contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique d'un projet d'extension verticale d'ISDND est abordée au chapitre 6 du document AFNOR BP X30-438 « Guide de bonnes pratiques pour les reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques de sites d'installation de stockage de déchets ».

En synthèse, la densité de stations de sondage et le nombre d'essais de perméabilité recommandés par ce guide sont identiques, quelle que soit la nature du projet d'ISDND (création, extension, extension en appui). Dans le cas d'une extension verticale, les stations de sondage doivent être réparties autour du casier existant.

#### 4.1.2. Géométrie des casiers existants

##### a) *Données nécessaires*

Les données suivantes concernant le fond et les flancs du ou des casiers supports sont nécessaires au bon dimensionnement du projet d'extension :

- extension (superficie) en fond de casier et au niveau du terrain naturel ;
- cotes du fond ;
- pentes du fond de casier et des talus internes ;
- localisation du ou des points bas topographiques ;
- localisation et dimensions des éventuelles digues de séparation ;
- présence et constitution de dispositifs d'étanchéité et de drainage en fond et en flancs.

##### b) *Sources d'informations*

Ces informations pourront être retrouvées dans les documents liés à l'autorisation (DDAE), la conception (PRO) et la réalisation (DOE) du ou des casiers supports.

Les rapports d'exploitation et bilans réguliers peuvent également apporter des informations quant à des modifications éventuelles apportées à des casiers en cours de remplissage.

En l'absence de tout ou partie de ces informations, il est possible de les acquérir par la mise en œuvre de méthodes d'investigations géotechniques et géophysiques adaptées, notamment les méthodes électriques (panneaux de résistivité) et sismiques, et la réalisation de sondages au droit du casier support.

### 4.1.3. Le massif de déchets existant

#### a) *Données nécessaires*

Une connaissance précise et exhaustive du massif de déchet support est essentielle pour l'évaluation de la cinétique, de l'amplitude et de la répartition des tassements sous la future extension, ainsi que pour la conception du nouveau casier et la vérification de la stabilité mécanique du massif rehaussé. Les données suivantes doivent être acquises préalablement à la conception du nouveau casier :

- suivi topographique précis et régulier du dôme de déchets, topographie générale récente ;
- type de déchets : déchets ménagers, déchets industriels banals, mélange ;
- historique de remplissage : cette information permet de connaître la répartition spatiale et par âge, éventuellement par type de déchets au sein du casier support ;
- modalités de mise en œuvre : nature et intensité du compactage ;
- éventuelles réinjections de lixiviat ;
- état de maturation et potentiel de dégradation des déchets ;
- saturation du massif de déchets, hauteur des lixiviats ;
- caractéristiques mécaniques des déchets : densité, paramètres de cisaillement, coefficients de compressibilité primaire et secondaire ;
- production et qualité des lixiviats ;
- production et qualité du biogaz.

#### b) *Sources d'informations*

Les informations relatives au type, à l'âge des déchets en présence et à l'historique de remplissage du casier sont normalement disponibles dans les documents relatifs à l'exploitation du site ou autres sources d'informations.

Ces mêmes documents comportent également les informations liées au suivi du casier, et notamment les volumes, débits et qualités des fluides (lixiviats et biogaz) lors de l'exploitation et de la post-exploitation du casier support. Ces informations, si elles ne sont pas suffisamment récentes, doivent être complétées par des mesures et des analyses.

Pour ce qui concerne les caractéristiques mécaniques des déchets, ces données peuvent être trouvées dans la bibliographie en fonction de l'âge et du type des déchets. Néanmoins, cette étude documentaire peut être étayée par la caractérisation des déchets réellement en présence, en plusieurs points répartis dans le volume du massif et à partir des données d'exploitation :

- la densité moyenne des déchets peut être déterminée à partir des tonnages stockés, du volume du massif et de l'historique du remplissage ;
- les paramètres de cisaillement (cohésion, angle de frottement) peuvent être évalués par une rétro-analyse de la stabilité du massif support ou essais au laboratoire ;
- le coefficient de compressibilité primaire est déterminé par essais in situ (préchargement, pressiomètre) ;
- le coefficient de compressibilité secondaire, lié à la dégradation des déchets, est déterminé par un suivi topographique suffisamment long (1 an minimum) du massif.

#### 4.1.4. Couverture du massif existant

Les informations relatives à la couverture du massif support permettront notamment de définir le réemploi potentiel de tout ou partie de la structure, ou des matériaux la constituant, au sein de la structure de fond du nouveau casier.

La présence et les caractéristiques des couches suivantes devront être précisées :

- couche support de végétation (épaisseur) ;
- couche de drainage (matériau, épaisseur) ;
- couche imperméable (géomembrane) le cas échéant ;
- couche de faible perméabilité (matériau, épaisseur, perméabilité) ;
- couche support (matériau, épaisseur, portance) ;
- couche de drainage des gaz (matériau, épaisseur).

Ces informations pourront être acquises par une analyse documentaire (archives des anciens projets, des plans de récolement, des données d'exploitation, etc.), mais aussi par des sondages à la pelle mécanique. On veillera également à vérifier le caractère inerte des matériaux constitutifs de la couverture, qui conditionnera leur éventuel réemploi.

#### 4.1.5. Dispositifs existants de gestion des fluides

La présence de dispositifs de gestion des fluides (lixiviats, biogaz) au sein du massif existant est un élément nécessaire pour la conception de l'extension.

Les points suivants doivent être abordés :

- gestion des lixiviats : barrière active, massif drainant, réseau de drains, type d'exutoire (gravitaire, puits) ;
- gestion des biogaz : réseau de drain, puits, densité, géométrie et conception.

Ces informations pourront être retrouvées dans les documents liés à l'autorisation (DDAE), la conception (PRO) et la réalisation (DOE) ainsi qu'à l'exploitation du ou des casiers support. Des investigations sur site permettront également d'identifier les éléments visibles (puits, exutoires) de ces dispositifs.

4.1.6. Synthèse des données nécessaires

		Étude impact	Estimation tassements	Géométrie extension	Barrière passive	Barrière active	Gestion des fluides	Stabilité	Suivi	Pertinence
Géologie, hydrogéologie, géotechnique	Géologie	x	x	x				x	x	N
	Hydrogéologie	x							x	N
	Géotechnique	x	x	x				x	x	N
Géométrie du casier existant	Plan topo surface fond	x	x	x				x	x	R
	Emprise	x	x	X				x	x	N
	Profondeur	x	x	x				x	x	N
	Pentes fond et flancs		x	x				x	x	R
	Localisation et dimension digues internes		x	x				x	x	R
	Barrière active					x	x			R
	Drainage lixiviats					x	x			F
	Barrière passive				x					F
	Drainage biogaz				x	x	x			R
Massif de déchets existant	Topographie du dôme		x	x	x	x	x	x	x	N
	Type de déchets	x	x	x	x	x		x	x	N
	Historique d'exploitation du casier		x	x	x	x		x	x	R
	Maturation des déchets		x	x	x	x	x	x	x	R
	Hauteur lixiviats	x	x	x				x	x	N
	Caractéristiques mécaniques des déchets		x	x	x	x		x	x	N
	Historique des débits et qualité lixiviats	x	x				x			R
	Historique des débits et qualité biogaz	x	x				x			R
Couverture du massif existant	Fonctions, épaisseur et matériaux des couches en présence				x					F
	Caractère inerte des matériaux									F
Équipements de gestion des fluides du massif existant	Réseau de drainage lixiviats (densité, géométrie)	x		x	x	x	x		x	R
	Exutoires des lixiviats (puits, gravitaire, nombre)	x		x	x	x	x		x	N
	Réseau de drainage biogaz (type, densité)			x	x	x	x		x	R
	Exutoires des biogaz (géométrie)			x	x	x	x		x	N

Pertinence des données : N : nécessaire ; R : recommandé ; F : facultatif

Tableau 1 : Synthèse des données nécessaires à un projet d'extension en appui sur des déchets anciens.

## 4.2. ESTIMATION DES TASSEMENTS DU MASSIF

Les massifs de déchets non dangereux sont généralement un conglomérat de différents types de matières et de sol mélangés entre eux sous l'action du compactage. Le comportement mécanique des massifs de déchets est parfois assimilé à celui de sols compressibles. Toutefois, même si cette approche reste pertinente, elle mérite d'être appliquée avec prudence. En effet, il est nécessaire de tenir compte des spécificités du matériau « déchet » en termes de composition, structure (broyage éventuel, compactage tridimensionnel, etc.), teneur en eau, dégradation au cours du temps, etc.

### 4.2.1. Origine et nature des tassements

Les tassements que subissent les massifs de déchets sont essentiellement de deux natures, l'une liée aux charges appliquées et l'autre à leur caractère évolutif. Pour bien appréhender le comportement des massifs de déchets et pour pouvoir évaluer efficacement les tassements auxquels ils donnent lieu, il convient de comprendre les paramètres et les mécanismes qui en sont la cause.

#### a) *Composition et structure d'un massif de déchets*

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

**D'un point de vue biologique**, il a été proposé de caractériser les déchets en fonction de leur seule vitesse de dégradation à partir des trois classes suivantes :

- déchets *rapidement dégradables* : déchets verts, fruits et légumes, 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 « 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 se 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.

Cette classe ne rend cependant pas compte des changements d'état (et donc de caractéristiques) s'opérant en fonction de l'évolution des contraintes et du temps. Bien qu'initialement incompressibles, certains encombrants ménagers peuvent devenir compressibles sous l'effet de surcharges importantes. Par exemple, 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 ;

- éléments « non déformables, non dégradables » : 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.

Quelle que soit sa composition, à tout instant, le déchet pourra être caractérisé par un certain nombre de paramètres physiques, notamment sa masse volumique, sa teneur en eau, sa porosité et sa perméabilité. Ces paramètres conditionnent fortement son comportement mécanique.

### **b) Mécanismes des tassements**

Les actions à l'origine des tassements peuvent être subdivisée schématiquement en cinq catégories :

- *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. Comme pour certains sols fins (argiles molles, tourbes, vases), ces phénomènes (bien que d'ampleur moindre) peuvent se prolonger à surcharge constante au cours de longues périodes (fluage mécanique) ;
- *actions biochimiques* : la décomposition (aérobie et anaérobie) de la matière organique du déchet entraîne un transfert de masse depuis la phase solide vers les phases gazeuse ou liquide. Cette perte de masse solide se traduit par une désagrégation partielle de la structure particulaire, phénomène qui s'accompagne d'un tassement à moyen et long terme ;
- *actions de la percolation et du tamisage* : la dégradation du déchet s'accompagne, en complément de la perte de masse, d'une diminution de la taille caractéristique de ses constituants. Cela entraîne un tamisage des particules dégradées au travers de la porosité (macropores), phénomène qui peut être accentué par l'action de vibrations (compactage, construction voisine, séisme). L'eau qui percole à travers les résidus de déchet accentue également cette migration des éléments fins vers les pores accessibles. Le tamisage est un phénomène continu à l'échelle d'un casier, ponctué de phases soudainement accélérées qui peuvent s'apparenter alors à des effondrements de la structure ;
- *actions physico-chimiques* : il s'agit essentiellement de la corrosion, de l'oxydation et de la 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 donc encore méconnu. Il a pour effet de réduire la granularité du déchet et de libérer des espaces précédemment fermés ;
- *interactions* : les différentes actions présentées précédemment ont pour caractéristique d'interférer entre elles, ce qui accentue les phénomènes de tassement. À titre d'exemple, la réorientation des éléments engendre des changements de volume ayant pour effet une modification du régime des percolations.

Les actions précédentes se superposent de manière complexe au cours du temps. Leur association peut néanmoins être représentée à partir de deux mécanismes de tassement distincts :

- le **tassement primaire** (à court terme) résultant essentiellement des actions mécaniques. Cette composante de courte durée (quelques jours) est généralement supposée indépendante du temps ;
- le **tassement secondaire** (à long terme), résultant essentiellement des actions biochimiques et physico-chimiques, supposé indépendant de la charge et pouvant se poursuivre pendant plusieurs décennies.

### c) **Évolution des tassements en fonction des phases d'exploitation d'une ISDND**

Les tassements apparaissent progressivement au cours des différentes phases de la vie d'une ISDND (voir Figure 5) :

1. une phase de **constitution du massif de déchets** (encore appelée phase de remplissage) de durée  $t_c$ , correspondant à la période d'exploitation, au cours de laquelle la hauteur de déchets ( $H$ ) augmente en fonction du temps ;
2. une phase de **couverture** du casier, généralement brève ;
3. une phase de **post-remplissage**, sans charge supplémentaire, au cours de laquelle la couverture du casier suit le mouvement vertical en compression du déchet. Ce tassement de surface pris à partir de  $t_c$  est noté  $w$ .

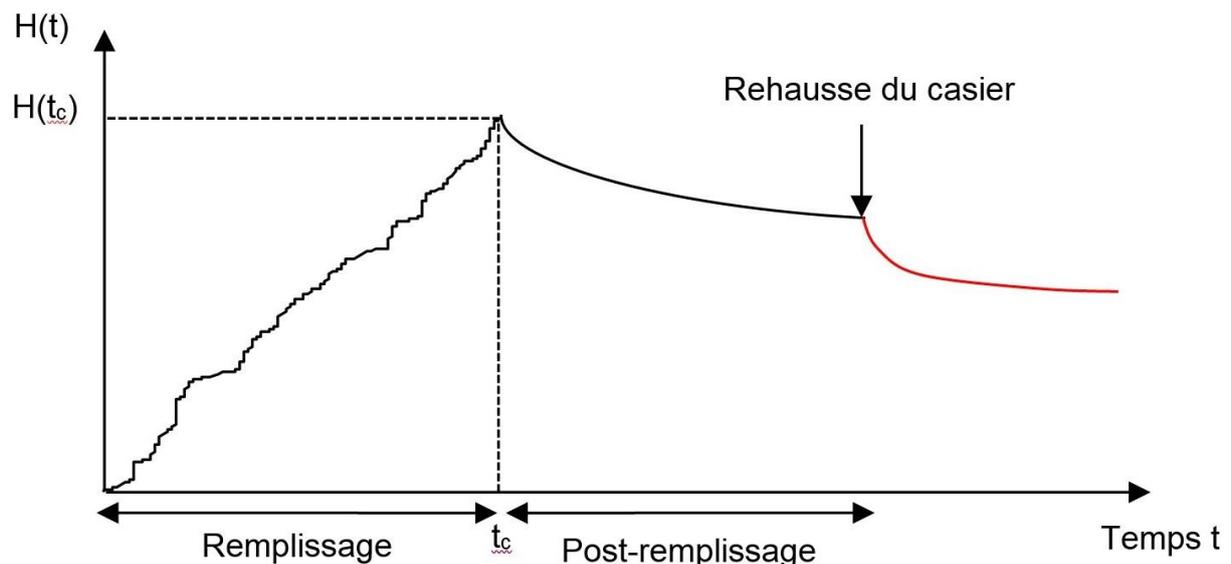


Figure 5 : Évolution de la hauteur d'un casier de stockage au cours du temps.

Dans le cadre des extensions verticales d'anciennes ISDND, une quatrième phase intervient après une phase de repos : il s'agit de la phase de **rechargement**. Cette phase intervient, à un moment plus ou moins avancé de l'évolution des tassements post-remplissage : elle entraîne une reprise accélérée des tassements (de nature essentiellement mécanique).

## 4.2.2. Ordre de grandeur des tassements

### a) *Tassements globaux*

Des tassements équivalents à 5 % à 30 % de la hauteur initiale des déchets peuvent apparaître dans les installations de stockage de déchets suite à la dégradation des déchets et aux autres phénomènes associés (ADEME, 2005). Au fur et à mesure de la dégradation, ces tassements vont se produire avec une intensité moindre au cours du temps mais pouvant représenter des niveaux cumulés de plusieurs mètres après 30 ans.

Compte tenu des variations spatiales inévitables au regard du type, de la hauteur et de l'âge des déchets enfouis, des écarts de tassement importants peuvent apparaître d'une zone à une autre d'un même casier de stockage, avec pour conséquence possible en cas de mauvaise conception dans un contexte d'extension verticale, une perte des fils d'eau gravitaires au niveau de la barrière de séparation entre anciens et nouveaux déchets. Pour ces raisons, il est important d'anticiper, en fonction de la répartition spatiale de la hauteur et de l'âge des déchets, l'amplitude des tassements attendus.

### b) *Tassements localisés*

Bien que constitués en majorité d'une matrice fine de comportement mécanique modérément variable spatialement (à âge et niveau de compression donné), les déchets non dangereux présentent une certaine hétérogénéité résultant de la présence potentielle de gros éléments (matelas, ferraille, etc.) ou au contraire d'éléments fortement dégradables qui peuvent faire l'effet de points plus ou moins durs ou mous au sein de la structure du matériau.

Aussi, en complément de l'étude des tassements à grande échelle, il convient, afin d'anticiper avec la plus grande prudence les déformations maximales qui peuvent se produire au sein d'un massif de déchets, de prendre en compte parallèlement le risque de survenue d'affaissements localisés à petite échelle et de tassements différentiels structurels.

### 4.2.3. Impact des tassements sur les éléments fonctionnels des casiers de déchets

En l'absence de solution de renforcement adéquate et/ou en cas de conception inadaptée, les tassements présentent des risques pour la stabilité et l'efficacité des éléments fonctionnels des anciens casiers (collecteurs biogaz / lixiviats) comme des nouveaux casiers (barrière de sécurité active (BSA) / barrière de sécurité passive (BSP)).

Élément structurel impacté	Tassements globaux	Tassements localisés
➤ BSA du nouveau casier		
Couche de drainage	Perte des fils d'eau par modification des pentes (cuvettes)	Non significatif
Géomembrane et géosynthétiques associés	Mise en traction généralisée notamment au droit des flancs et talus	Mise en traction localisée (uni ou bidirectionnelle)
➤ BSP du nouveau casier		
Barrière passive	Apparition de zones de traction notamment au droit des flancs et talus	Apparition de zones de traction et risques de fissuration
➤ Collecte du biogaz et des lixiviats de l'ancien casier		
Puits de drainage du biogaz et/ou des lixiviats	Flambage voire rupture des puits	
Tranchées de drainage, collecteurs enterrés	Perte de continuité de la pente, risque d'obstruction par condensation	Rupture par cisaillement

Tableau 2 : Impacts possibles des tassements sur les éléments fonctionnels des casiers.

### 4.2.4. Évaluation des tassements par modélisation

#### a) Modélisation des tassements à grande échelle

Plusieurs modèles de prédiction de tassements de déchets ont été développés depuis les années 1960, que l'on peut répartir en trois catégories principales : modèles issus de la mécanique des sols, modèles biochimiques et modèles mixtes biomécaniques.

Afin d'anticiper les mouvements de la future barrière d'extension de casier, on privilégiera l'application du 'Modèle Incrémental de Prédiction des Tassements' (encore appelé modèle ISPM) [Olivier (2003), ADEME (2005)] 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).

Les données d'entrée de ce modèle sont essentiellement :

- la géométrie du massif de déchets ;
- la surcharge ;
- l'historique d'exploitation (phasage au cours du temps) ;
- le coefficient de compression primaire  $C_R^*$  ;
- le coefficient de compression secondaire  $C_{\alpha\epsilon}^*$ .

Les progrès significatifs réalisés dans l'évaluation de la compressibilité des déchets permettent de proposer des gammes de variation raisonnables pour  $C_R^*$  et  $C_{\infty}^*$ . Pour une précision optimale, il est toutefois préconisé d'appliquer ce modèle par rétro-analyse (ou calibration) au moyen de mesures de terrain sur une période minimale de 12 mois (et idéalement plusieurs années). Dans le cas d'ISDND bénéficiant de relevés topographiques réguliers et particulièrement soignés (en termes de résolution et de précision de mesure), cette calibration peut aussi parfois être effectuée à partir de plans d'archive (sans nouveau levé topographique), moyennant certaines précautions dans l'analyse.

Pour une description détaillée de la méthode et de son application, on renverra le lecteur vers le guide ADEME « Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de Classe II (Déchets ménagers et assimilés) (2005) ».

### ***b) Évaluation des affaissements localisés***

Contrairement aux tassements à grande échelle, aucun modèle fiable n'est en mesure d'évaluer précisément les affaissements localisés. Cette détermination est faite de manière empirique, sur la base des retours d'expérience d'autres sites. On peut considérer comme aléa maximal la formation d'une cavité franche d'un diamètre de l'ordre de 1,0 à 2,0 m.

### ***c) Évaluation des tassements différentiels structurels***

Les tassements différentiels structurels sont des déformations qui se développent au droit des zones de variations significatives des paramètres géométriques et/ou de nature comme :

- les variations d'épaisseur et de nature (âge, composition) du support compressible ;
- la variation de la surcharge (épaisseur et poids volumique).

L'identification des zones potentielles de développement des tassements différentiels structurels nécessite ainsi une analyse de la géométrie et de la nature du support ainsi que de la surcharge du projet d'extension en vue de déterminer des zones homogènes en regard des paramètres précédents. Les tassements différentiels se développeront aux interfaces ou à l'aplomb/verticales de ces zones.

L'analyse peut s'opérer par profils comme illustré sur le schéma suivant. L'identification des zones de tassements différentiels doit être complétée par une analyse temporelle de l'évolution de la surcharge au cours de l'exploitation. L'évolution du tassement différentiel pourra évoluer de façon favorable ou défavorable dans le temps, voire les deux, alternativement, en fonction du schéma de remplissage. On pourra ainsi identifier d'éventuelles phases critiques de chargement et/ou des limites en termes de mise en place de la surcharge.

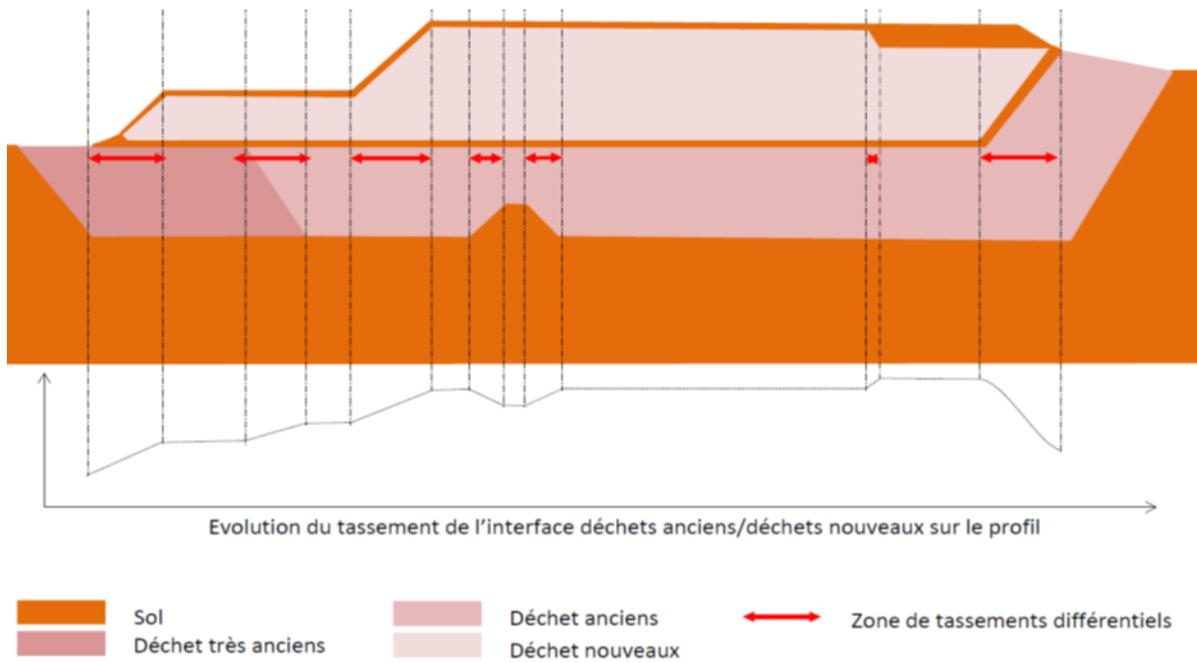


Figure 6 : Illustration du profil de tassements à l'interface en fonction de la géométrie du casier support et du casier d'extension.



## 5. Conception

### 5.1. COUCHE DE FORME

#### 5.1.1. Fonctions et objectifs

Dans le cadre d'une extension verticale de casier d'ISDND, la couche de forme remplit les fonctions suivantes :

- séparation des déchets sous-jacents et de la barrière passive ;
- surface support propre et plane pour la mise en œuvre de la barrière passive reconstituée ;
- support présentant les caractéristiques mécaniques nécessaires (portance) à la bonne mise en œuvre de la barrière passive reconstituée ;
- répartition et atténuation des déformations dues aux tassements locaux des déchets sous-jacents.

De la bonne conception de la couche de forme (matériaux, épaisseur, caractéristiques mécaniques) dépend donc la pérennité à long terme des dispositifs sus-jacents d'étanchéité et de drainage.

#### 5.1.2. Préparation des déchets

##### a) Opérations préliminaires

Les couches superficielles en place (couverture) pourront être retroussées. Les couches de terres végétale ou support de végétation devront obligatoirement être enlevées.

La surface du massif de déchets en place peut être profilée en fonction des tassements attendus (cf. ch.4.2) afin de maintenir les fonctions d'étanchéité et de drainage.

La portance des déchets peut être améliorée par compactage statique ou dynamique, par préchargement, ou tout autre procédé d'amélioration de sol. Ceci implique, au préalable, d'étudier le contexte hydraulique du massif (hauteur et répartition des lixiviats) et de sélectionner la méthode la plus adaptée en fonction de ce contexte.

##### b) Compactage mécanique statique

Préalablement aux opérations de mise en œuvre de la couche de forme, la surface des déchets peut être compactée avec les moyens disponibles sur site (compacteur), afin d'atteindre les objectifs suivants :

- égaliser la surface des déchets ;
- augmenter la densité de la frange supérieure des déchets afin de permettre la circulation des engins et le compactage de la couche de forme.

L'action du compactage statique est toutefois limitée à la frange supérieure des déchets (inférieure à 1 m). Dans le cas où le massif de déchets présente une faible portance, il est envisageable de retrousser une épaisseur plus importante de déchets (1 à 2 m) et de procéder à un recompactage en couches minces successives. Cette procédure permet également d'homogénéiser la couche supérieure des déchets supports, et de s'assurer de l'absence de corps creux volumineux, plus particulièrement présents dans les déchets les plus anciens, susceptibles de provoquer des affaissements localisés.

### c) **Préchargement**

Cette méthode, typiquement utilisée pour améliorer le comportement des sols fins, peut également être appliquée aux déchets.

Elle consiste à appliquer, préalablement à la construction du casier, une contrainte verticale uniformément répartie sur la surface du massif support. Cette contrainte peut notamment être appliquée par constitution d'un remblai temporaire sur le massif support.

Cette méthode permet, selon la géométrie et la densité du remblai temporaire ainsi que la durée du préchargement, d'anticiper les tassements primaires et d'améliorer la portance du massif support sur une épaisseur pouvant atteindre l'intégralité de la couche de déchets. Elle permet aussi d'acquérir des données précises sur les tassements du support dans la mesure où le remblai de rechargement est homogène.

### d) **Compactage dynamique**

Le compactage dynamique peut être utilisé pour les déchets avec pour objectifs de délimiter l'amplitude des tassements et de maîtriser leur évolution dans le temps.

La méthode consiste à appliquer une contrainte dynamique verticale (chute d'un pilon) selon un maillage régulier à la surface du massif de déchets.

L'efficacité de la consolidation dynamique dépend de :

- la nature du déchet (élasticité du squelette, porosité, dégradation) ;
- la profondeur du déchet (profondeur d'action < 7 à 9 m) ;
- la teneur en eau du déchet et niveau de lixiviat dans le massif (efficacité quasi-nulle en cas de saturation, les contraintes étant reprises par l'eau elle-même).

### e) **Synthèse**

Le tableau suivant synthétise les avantages et inconvénients des techniques de préparation des déchets évoquées ci-dessus.

Technique	Avantages	Inconvénients
Compactage mécanique statique	Simplicité Matériel souvent disponible sur site Coût	Faible profondeur d'action (< 1 m)
Compactage dynamique	Rapidité Profondeur d'action Possibilité de ballaster les cratères	Énergie de mise en œuvre Logistique (atelier de compactage) Coût
Pré chargement	Technique éprouvée Simplicité Profondeur d'action	Disponibilité et coût des matériaux Énergie de mise en œuvre Durée du processus

Tableau 3 : Synthèse des techniques de préparation des déchets.

### 5.1.3. Matériaux et structure de la couche de forme

La couche de forme doit présenter la portance et l'état de surface nécessaire à la mise en œuvre de la barrière passive.

Les matériaux constitutifs de la couche de forme doivent présenter des caractéristiques compatibles avec cette fonction, notamment une courbe granulométrique étalée. Les matériaux de type Grave Non Traitée (GNT) 0/X sont adaptés à cette fonction. La fraction granulométrique supérieure X sera déterminée selon les recommandations du GTR 92.

Exemples de matériaux :

- les mâchefers d'incinérations de déchets ménagers déferrailés présentent des caractéristiques géotechniques (granulométrie, portance, évolution dans le temps) qui en font de bons candidats pour une valorisation en couche de forme d'extensions verticales d'ISDND ;
- les déchets inertes, peuvent également être envisagés, éventuellement en mélange avec un sol fin, afin de reconstituer un matériau présentant le comportement d'une GNT ;
- sols de classe F du GTR 92.

L'épaisseur et la portance de la couche de forme sont adaptées aux caractéristiques du massif de déchets support et aux conditions de mise en œuvre de la barrière reconstituée, avec un minimum de 0,5 m pour l'épaisseur et  $E_{v2}=20$  MPa pour la portance. Le cas échéant, la couche de drainage des gaz du massif de déchets support peut être intégrée à la couche de forme.

### 5.1.4. Renforcement de la couche de forme

#### a) Produits de renforcement

Dans le cas de l'utilisation en ISDND, en plus des conditions standards pour la construction avec géosynthétiques de renforcement, on attirera l'attention sur les points suivants :

- la durée de service de l'ouvrage ;
- le risque de contact avec des lixiviats (phénomène d'hydrolyse alcaline) ;
- la température d'exposition en service, supérieure ou égale à 30 °C, qui doit faire l'objet d'un suivi. Pour la durabilité, l'effet de la température a des effets directs importants sur :
  - le fluage du produit. Il est donc à considérer à la température d'exposition du géosynthétique de renforcement, ce qui rend quasi impossible l'utilisation des Polyoléfines (famille de produit type Polypropylène (PP), Polyéthylène (PE), ...),
  - l'accélération des phénomènes d'hydrolyse d'origine alcaline. Sur les Polytéréphtalate d'éthylène (PET), on observe dans le cas de l'hydrolyse alcaline, une perte de raideur importante dès le départ. Sur le Polyvinyle Alcool non hydrosoluble (PVA), la raideur est stable.

#### b) Localisation de la nappe de renforcement

Le principe du renforcement par géosynthétiques repose notamment sur les frottements à l'interface entre la nappe de renforcement et les couches de matériaux naturels qui l'encadrent. Afin de présenter un fonctionnement optimal, la nappe de renforcement devra donc être disposée au sein de la couche de forme, ou à la base de celle-ci, à l'interface avec la couche de drainage des biogaz des déchets supports.

### **c) Dimensionnement du renforcement**

Pour pouvoir aborder le dimensionnement, il convient de rappeler les principaux mécanismes impliqués dans le renforcement par géosynthétique des affaissements globaux et localisés liés aux déchets sous-jacents (cf. §d)). Ceux-ci permettent de guider la démarche de conception (décrite dans le §e)). Les méthodes de calcul sont mentionnées dans l'annexe 2.

### **d) Mécanismes impliqués dans le renforcement par géosynthétique des affaissements globaux et localisés**

La mise en œuvre d'extensions verticales génère des nouvelles contraintes sur les structures sous-jacentes (nouvelle barrière active et/ou passive, déchet sous-jacent), la géogridde a pour objectif de limiter l'effet des affaissements globaux et localisés dans les barrières passive et active afin de préserver leur efficacité. Le rôle de cette confortation consiste à reprendre les charges qui s'appliquent au-dessus de la géogridde comme le poids des nouveaux déchets, de la barrière active, de la barrière passive et les charges d'exploitation.

Sous l'effet de ces charges, la géogridde va se déformer en membrane au-dessus de l'affaissement entraînant sa mise en tension. Les efforts de traction sont équilibrés grâce à une mobilisation progressive des ancrages de part et d'autre de l'affaissement. Au cours de ce phénomène d'affaissement contenu, les structures sus-jacentes vont se déformer de manière contrôlée entraînant un tassement à l'intérieur du nouveau massif de déchet.

La bonne conception de la confortation vise à dimensionner la géogridde :

- 1) pour uniformiser les déformations globales ;
- 2) Pour contenir les déformations localisées et, en particulier, limiter les déformations des barrières passive et active ;
- 3) Pour éviter la rupture des barrières.

Note : la rupture de la géogridde implique la rupture des barrières, mais il peut y avoir rupture de celles-ci avant rupture de la géogridde (déformation excessive pour d'autres composants).

La Figure 7 illustre les principales définitions géométriques et notations utilisées dans la suite de ce document.

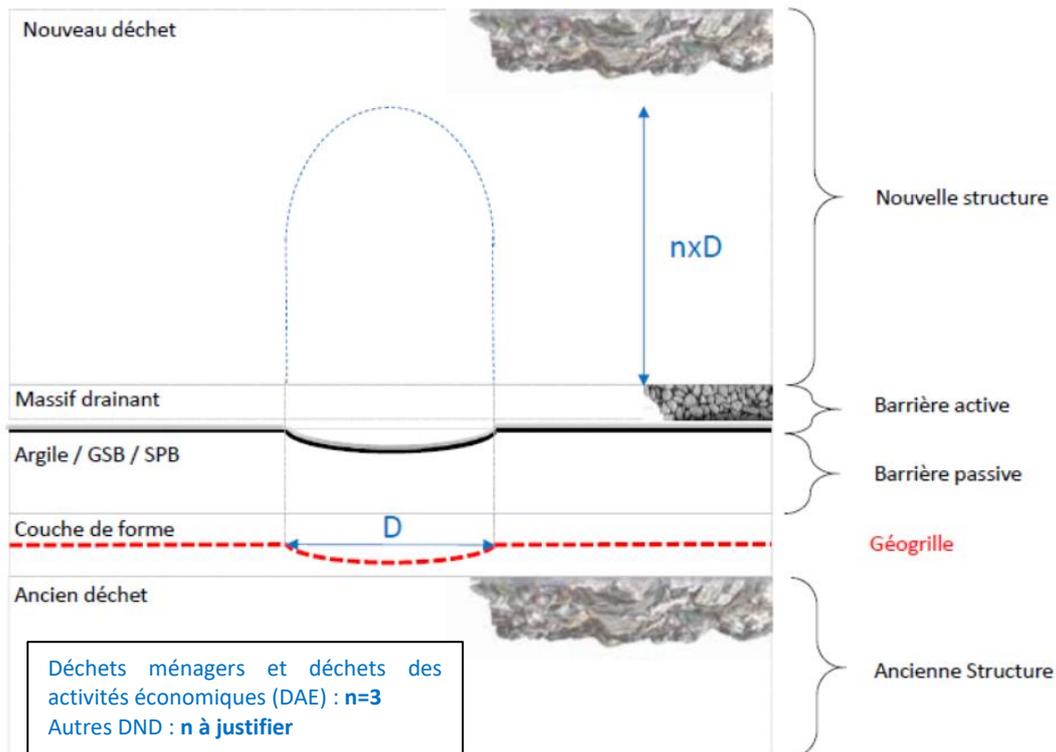


Figure 7 : Principe du renforcement par géogrille.

La Figure 8 présente le principe de fonctionnement d'une structure renforcée par géogrille lors d'un affaissement de la structure sous-jacente. Par souci de simplification, on considèrera que :

- l'affaissement est de forme cylindrique ;
- lors de l'affaissement, l'évolution géométrique sous la géogrille est progressive dans le temps jusqu'à atteindre le diamètre nominal maximum.

Plusieurs périodes de temps peuvent être distinguées ;

- la période (I) correspond à la phase de mise en place de la géogrille, des barrières passives et actives ;
- pendant la période (II) les nouvelles contraintes ne génèrent pas d'affaissements localisés, mais uniquement des tassements globaux ;
- la période (III) correspond à la phase de début d'affaissement localisé jusqu'à atteindre la dimension nominale ; cette phase peut être plus ou moins longue ;
- enfin au début de la période (IV), l'affaissement localisé a atteint sa géométrie définitive et ce jusqu'à la fin de la période post-exploitation.

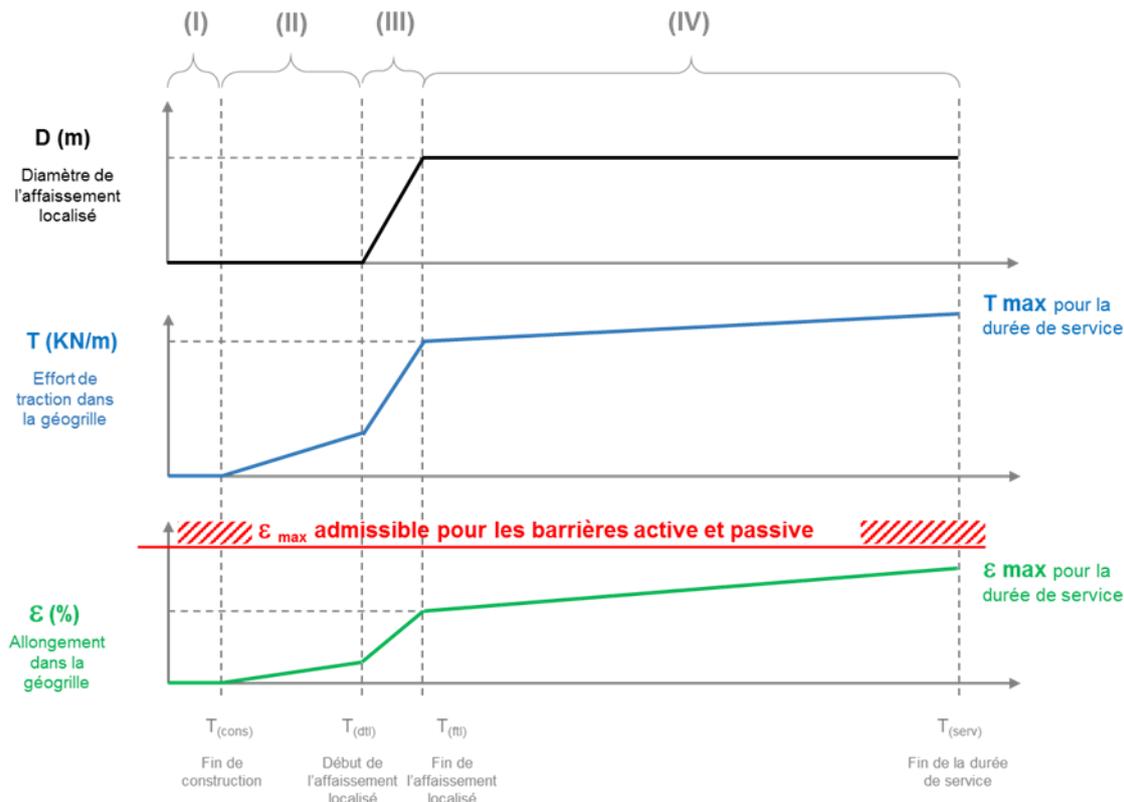


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'une structure renforcée par géogrille lors d'un affaissement de la structure sous-jacente.

Pendant la période (I), la géogrille subit les contraintes et les dégradations éventuelles liées à la mise en œuvre, ainsi que les dégradations liées à l'environnement chimique.

Pendant toute la période (II), la géogrille est en général peu sollicitée en traction, les tassements s'effectuant sur de grande surface ; elle continue à subir des dégradations liées à l'environnement chimique avoisinant amplifiées par l'effet de la température.

Lors de l'apparition de l'affaissement localisé (période (III)), la géogrille se met en tension au-dessus de celui-ci et latéralement dans les zones d'ancrage.

Ensuite, lorsque le diamètre nominal de l'affaissement est stabilisé (période (IV)), sous l'effet des charges, la géogrille est maintenue en tension. Elle est alors soumise au fluage en plus des actions liées à l'environnement chimique. S'ensuit une déformation plus importante de la géogrille, qui entraîne une augmentation des déformations dans les barrières active et passive. L'allongement max dans la géogrille pour la durée de service et dans les conditions d'utilisation du site doit rester inférieur à l'allongement maximum admissible pour maintenir l'efficacité des barrières active et passive.

### e) Conception des ouvrages de renforcement par géogridde

La conception des ouvrages de renforcement par géogridde suit les règles usuelles de conception des ouvrages géotechniques. Les principes de justification tiennent compte, en autres, du cadre normatif en étant conforme aux principes de calcul aux états limites définis dans la norme NF EN 1990 et en respectant les exigences de la norme NF EN 1997-1 applicable au calcul des ouvrages géotechniques.

1) Données nécessaires au dimensionnement des ouvrages de renforcement :

- le diamètre nominal de l'affaissement localisé. En général  $D = 1,0$  à  $2,0$  m ;
- la déformation maximale admissible pour la durée de service de l'ouvrage et dans les conditions du site dans les barrières active et passive :
  - pour une géomembrane en PEHD de 2 mm de la barrière active, la littérature retient une valeur de 3 % (limit of stress and strain: design criteria for protective layers S. Seeger & W. Muller),
  - pour la couche d'argile de la barrière passive, la littérature retient une déformation maximale de 1-2 % avant l'apparition de fissure significative ;
- la gamme de températures à laquelle le géosynthétique sera exposé en service. Pour un premier casier d'extension en appui, en l'absence de possibilité de mesure in situ, la température à prendre en compte ne peut être inférieure à 30 °C. Le suivi de la température au niveau du géosynthétique de renforcement de ce casier permettra de dimensionner le géosynthétique des casiers ultérieurs ;

2) Les principales méthodes de dimensionnement :

La distribution des charges sur la géogridde est prise uniforme et verticale.

Dans la configuration des extensions verticales, on retiendra les points suivants :

- pas de foisonnement pour les différents matériaux (argile, matériau drainant, déchets) :  $C_e=1$  ;
- remontée verticale  $\theta = 90^\circ$  à l'intérieur de la nouvelle barrière passive et donc  $D_s = D$  (pour des déchets ménagers) ;
- que la surcharge due aux poids des nouveaux déchets est limitée à  $H = D \cdot 3$ , comptabilisée au-dessus de la couche de matériau drainant de la barrière active ;
- le calcul de la contrainte sur la géogridde prend donc en compte la surcharge due au déchet, les contraintes issues des différentes barrières active et passive, de la couche de forme et les surcharges permanentes ou temporaires pondérées ;
- lors de l'affaissement localisé, il s'effectue un glissement de la géogridde lors de la mobilisation des efforts d'ancrage mise en évidence par L. Briançon et P. Villard en 2008. L'allongement maximum admissible par les barrières active et passive doit tenir compte de ce phénomène, déclaré par les auteurs comme non négligeable. Il s'agit d'un calcul itératif à partir de la raideur résiduelle de la géogridde pour la durée de service en zone courante. La raideur de la géogridde doit être augmentée pour compenser son déplacement au niveau des ancrages afin de respecter les critères de déformation maximale pour les barrières active et passive ;

### 3) Comportement en déformation de la géogrille :

Compte tenu de l'importance du comportement en déformation de la géogrille, il est important de rappeler leurs principes généraux d'évolution dans le temps. Trois principaux facteurs influencent le comportement dans le temps :

- l'endommagement lors de l'installation et le compactage ;
- le fluage en traction à la température de service ;
- et le vieillissement dépendant des conditions d'environnement et de température du produit.

Ces trois facteurs sont intégrés dans les normes de dimensionnement des renforcements par géosynthétique sous la forme de coefficient réducteur sur la résistance à la traction  $\Gamma_{\text{instal}}$ ,  $\Gamma_{\text{flu.}}$ ,  $\Gamma_{\text{veill.}}$ .

Concernant les déformations, on retiendra :

- la distinction entre les endommagements interne et externe, ces derniers entraînant également une réduction de la raideur. (Muller-Rochholz 2003) ;
- l'incidence du fluage sur la déformation est représentée en utilisant les courbes d'isochrones (EN ISO 13431) ;
- sur les PET, pour l'hydrolyse en pH neutre ou acide, on n'observe pas ou très peu de réduction de raideur, ce qui n'est pas le cas de l'hydrolyse alcaline où une perte de raideur est observée dès le départ. Sur les PP, l'augmentation du taux de cristallinité peut dans certain cas augmenter la raideur. Sur les PVA non hydrosolubles, la raideur est stable.

#### **f) Stratégie de dimensionnement**

Les différents états-limites à considérer sont :

- 1) les états-limites d'instabilité par défaillance du renforcement, soit par insuffisance de résistance à la traction, soit par insuffisance de la résistance de l'interaction entre le renforcement et le sol ;
- 2) les états-limites d'instabilité par déformation excessive, qui consiste à vérifier que la déformation maximale admissible dans la barrière active ne soit pas dépassée afin de garantir la poursuite du bon fonctionnement de l'ouvrage même après les affaissements globaux et localisés.

On doit vérifier qu'aucun de ces états-limites ne peut être atteint ni au cours de la construction, ni pendant sa durée d'utilisation prévue.

En conformité avec les normes existantes sur les ouvrages renforcés, on retiendra l'approche 2 pour la justification des renforcements par géogrille. Pour une géomembrane en PEHD de 2 mm, on retiendra une valeur d'élongation maximale à long terme de 3 % à l'état limite ultime (ELU).

Le tableau ci-dessous résume les facteurs partiels à l'ELU conformément à l'annexe nationale (NF EN 1997-1/NA).

	Symbole	ELU A1 + M1 +R2
<b>Action</b>		A1
Permanente défavorable	$\gamma_{GSup}$	1,35
favorable	$\gamma_{GInf}$	1,0
Temporaire défavorable	$\gamma_{QSup}$	1,5
favorable	$\gamma_{QInf}$	0
<b>Sol</b>		M1
Angle de frottement effectif	$\gamma_{\varphi'}$	1,0
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1,0
Cohésion non-drainé	$\gamma_{cu}$	1,0
<b>Géogrille</b>		R2
Résistance à la traction	$\gamma_{M,t}$	1,25
<b>Interaction</b>		
Résistance au glissement	$\gamma_{R,t}$	1,35

Tableau 4 : Synthèse des coefficients partiels à l'ELU.

## 5.2. BARRIÈRE D'ÉTANCHÉITÉ PASSIVE

### 5.2.1. Fonction, principe d'équivalence

Le dispositif d'étanchéité de fond et de flancs des ISDND est constitué de deux barrières distinctes et complémentaires :

- la barrière active, constituée d'un niveau drainant surmontant une géomembrane. Elle a pour fonctions l'étanchéité, le drainage et la collecte des lixiviats en vue de leur traitement ;
- la barrière passive, constituée des terrains en place ou reconstituée, comprend une couche peu perméable surmontant, dans le cas des ISDND, une couche plus perméable dite « d'atténuation ». Elle a pour fonctions, d'une part, de limiter les flux de lixiviats vers le milieu naturel et, d'autre part, de réduire la charge polluante de ces lixiviats.

La réglementation autorise, sous certaines conditions, le recours à une solution « équivalente » pour le dispositif de barrière passive. Cette solution, qui ne présente pas, par définition, des caractéristiques identiques à la solution réglementaire de base, doit assurer un même niveau de protection en termes d'impact potentiel d'une installation de stockage sur une ressource en eau souterraine.

### 5.2.2. Spécificités d'une barrière passive en appui sur des déchets

La barrière d'étanchéité passive d'un casier d'extension en appui se distingue de celle d'un casier usuel par sa situation en appui total ou partiel sur un massif de déchets dont la géométrie est susceptible d'évoluer sous l'action des tassements primaires et secondaires (voir ch. 4.2).

La conception de la barrière passive doit lui permettre de garantir son intégrité et son bon fonctionnement pendant la période d'exploitation et de post-exploitation du casier supérieur. D'autre part, la structure de la barrière passive doit permettre de résister à d'éventuelles déformations et donc de conserver ses propriétés hydrauliques :

- pour les barrières reconstituées en matériaux naturels, éventuellement traités, le concepteur s'assurera que la plasticité du matériau une fois mis en œuvre est suffisante pour absorber les déformations sans perte de performances hydrauliques. L'augmentation de l'épaisseur de cette couche peut également s'avérer pertinente dans ce but ;
- pour les éventuels renforcements hydrauliques en matériaux synthétiques (géosynthétiques bentonitiques par exemple), le plan de calepinage (orientation et largeur des joints) garantit un recouvrement suffisant des lès après déformation.

Réglementairement, le dispositif de barrière passive doit être conforme à l'article 9 de l'Arrêté Ministériel du 15/02/2016. Il comportera donc, *a minima*, une couche reconstituée de 1,0 m à  $k \leq 1.10^{-9}$  m/s.

Il pourra être complété, dans le cas du recours à une solution équivalente, par un renforcement en sable bentonite polymère (SBP) ou en géosynthétiques bentonitiques (GSB) par exemple.

S'il est démontré, d'une part, que le contexte hydrogéologique de l'ISDND est favorable et que, d'autre part, la pleine maturation des déchets du casier support est acquise, le massif de déchets inférieur pourra être intégré au dispositif de barrière passive en tant que couche d'atténuation (réglementairement 5,0 m à  $k \leq 1.10^{-6}$  m/s).

### 5.2.3. Matériaux

#### a) Les matériaux naturels

Pour la sélection et la mise en œuvre de matériaux naturels en barrière d'étanchéité passive, on renvoie le lecteur vers le guide AFNOR « Guide de bonnes pratiques pour la conception et la mise en œuvre des barrières peu perméables reconstituées » à compter de sa date de publication.

#### b) Les géosynthétiques bentonitiques (GSB)

Un GSB est typiquement constitué de poudre ou de granulés de bentonite pris en sandwich entre deux géotextiles solidaires. Dans le cadre des ISD, on rencontre le plus fréquemment les GSB aiguilletés et les GSB cousus avec couche d'encapsulation.

Les GSB utilisés en étanchéité de fond et flancs de casier d'ISD sont principalement des GSB à base de bentonite sodique (naturelle ou activée). Des GSB à base de bentonite calcique sont également utilisés mais dans ce cas, la masse surfacique de bentonite est supérieure.

Les Fascicule n°12<sup>1</sup> et 13<sup>2</sup> du CFG explicitent clairement le dimensionnement, la mise en œuvre et le contrôle des barrières passives intégrant un GSB.

On rappellera toutefois ici les largeurs de recouvrement minimales entre les lés de GSB en flancs de casiers, recommandées par le CFG. Le respect de ces recouvrements participe de la pérennité à long terme des barrières d'étanchéité en GSB :

- ≤ 5 m de rampant : 0,3 m de recouvrement ;
- Entre 5 et 20 m de rampant : 0,4 m ;
- > 20 m de rampant : 0,6 m.

D'autre part, la valeur de recouvrement usuelle en fond de casier est de 0,2 m. Toutefois, compte tenu des déformations susceptibles d'intervenir au droit des tassements localisés, un recouvrement minimal de 0,4 m en fond de casier est recommandé.

### **c) Le sable bentonite polymère (SBP)**

Les mélanges sable-bentonite-polymère sont constitués d'une proportion précise de sable, de bentonite et d'un polymère. Le matériau peut être confectionné sur le site de mise en œuvre ou sur le site d'extraction du sable. Il est typiquement compacté sur une épaisseur de 7 (couverture) ou 9 cm (fond de casier). Il s'agit d'une alternative aux GSB pour le renforcement de couches peu perméables.

Le mélange SBP présente des caractéristiques mécaniques favorables à la stabilité du matériau en talus, du fait de la proportion de sable importante. Par ailleurs, la relativement faible proportion de smectite sodique implique a priori une moindre sensibilité à l'agression cationique par rapport à un GSB. Enfin, l'épaisseur du matériau (7 à 9 cm) représente un atout en termes de durabilité.

## **5.3. BARRIÈRE D'ÉTANCHÉITÉ ACTIVE**

Réglementairement, le fond et les flancs des casiers de stockage sont recouverts d'une barrière active destinée à assurer le drainage et la collecte des lixiviats.

Du haut vers le bas, cette barrière active est constituée :

- d'un niveau drainant, granulaire, d'une épaisseur minimale de 0,50 m et d'une perméabilité minimale de  $1.10^{-4}$  m/s. Cette couche peut être adaptée via une étude spécifique ;
- une couche de protection (anti poinçonnement) ;
- une géomembrane « résistante aux sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques pendant toute la durée d'exploitation et de suivi long terme ».

Actuellement, les géomembranes les plus couramment mises en œuvre en ISDND sont constituées de Polyéthylène Haute Densité (PEHD) et présentent une épaisseur de 2 mm. Ce matériau est notamment réputé pour sa résistance chimique vis-à-vis des lixiviats et tolère des déformations à l'élongation de l'ordre de 4 à 6 %. Toutefois, d'autres types de matériaux, plus tolérants notamment aux contraintes de traction, peuvent s'avérer pertinents pour une application spécifique en extension en appui d'ISDND. C'est le cas notamment du Polyéthylène Basse Densité Linéaire (PEBDL) dont la déformation acceptable à la traction est de l'ordre de 8 à 12 %.

<sup>1</sup> Fascicule n° 12 : Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques (CFG, 1998).

<sup>2</sup> Fascicule n° 13 : Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets (CFG, 2011).

## 5.4. ANCRAGES DES GÉOSYNTHÉTIQUES

### 5.4.1. Géosynthétiques de renforcement du support

Le géosynthétique de nappe de renforcement du support, installé au droit de la couche de forme, est destiné à limiter l'effet des tassements localisés sur le dispositif d'étanchéité sus-jacent. Il doit en particulier supprimer le risque d'une déformation et d'une mise en traction excessives des barrières passives et actives. Il est ancré de part et d'autre de la zone sujette à tassements localisés. L'efficacité de son ancrage est optimale si la nappe s'intègre dans un matériau frottant.

#### a) *Extension verticale*

Une digue périphérique est nécessaire pour réaliser les différents ancrages du Dispositif d'Étanchéité et Drainage par Géosynthétiques DEDG en crête et celui de la nappe de renforcement du support sous la digue. Il est important de noter que la largeur de la crête de digue doit être suffisante pour permettre l'accès des engins dans les différentes phases d'exécution des ancrages.

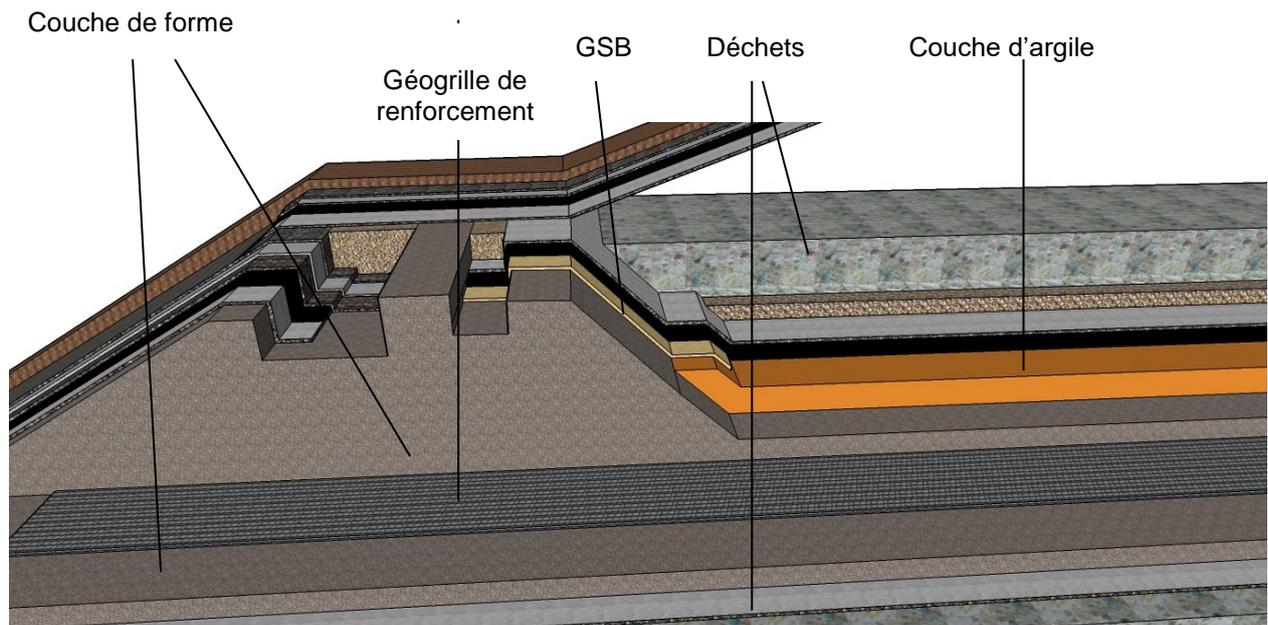


Figure 9 : Digue périphérique d'extension verticale ou sommitale d'un casier avec ancrage de la géogrille sous la digue périphérique.

### b) Extension latérale

La géogrille est ancrée en tête de talus dans une surépaisseur de la couche de forme du talus. Cet ancrage doit faire l'objet d'un dimensionnement préalable aux travaux.

Dans le cas où les talus comportent des risbermes, un lestage doit être prévu *a minima* pour prévenir la formation de soulèvements type « peaux de tambour » (voir Figure 10 et Figure 11).

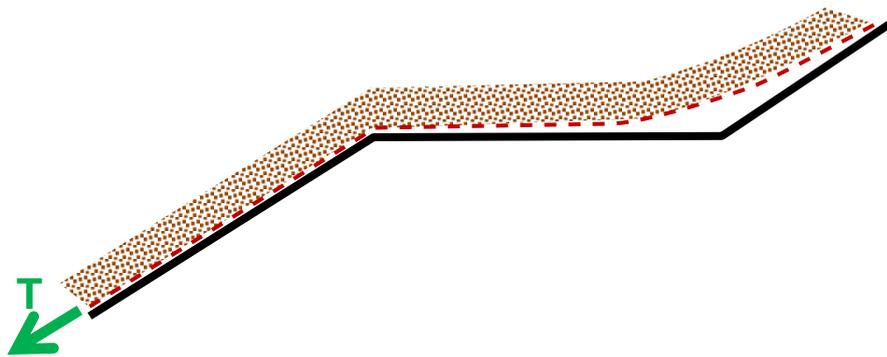


Figure 10 : Illustration de l'effet peau de tambour.

Dans le cas de grande longueur de talus (supérieures aux longueurs des rouleaux de géosynthétiques), il est nécessaire de prévoir un ancrage en risberme (voir Figure 12). Il faut toutefois alerter les concepteurs sur le fait que cette solution d'ancrage intermédiaire en risberme présente de nombreuses difficultés de mise œuvre des différentes couches de géosynthétiques.

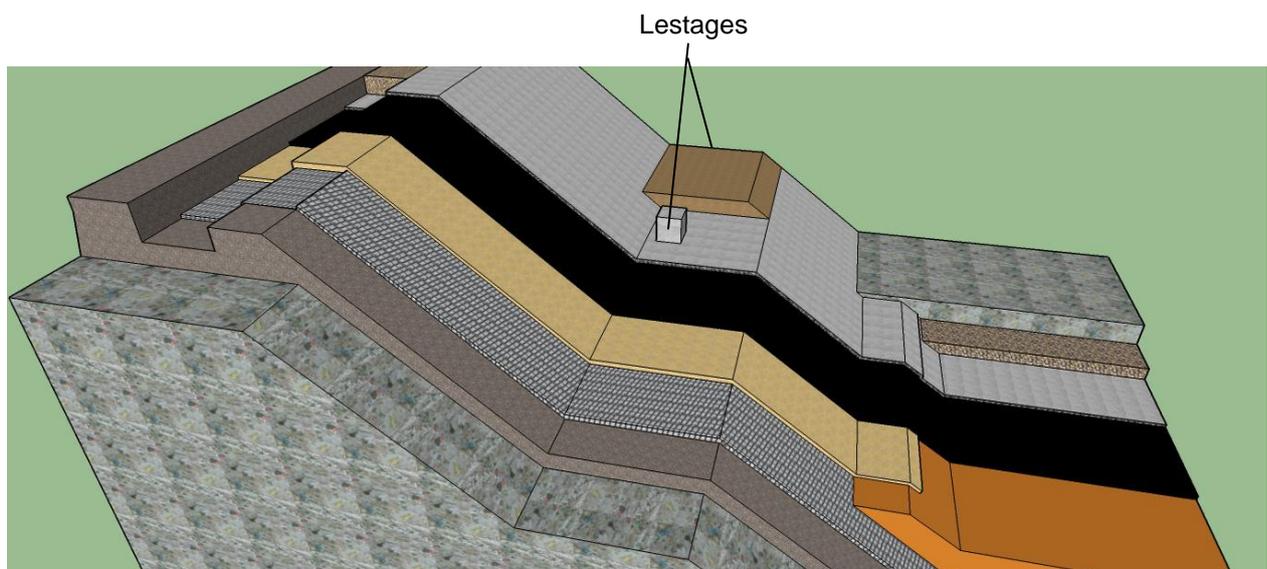


Figure 11 : Extension latérale avec un dispositif d'étanchéité géosynthétique (DEG) et géogrille ancrés en tête et lestés en risberme intermédiaire.

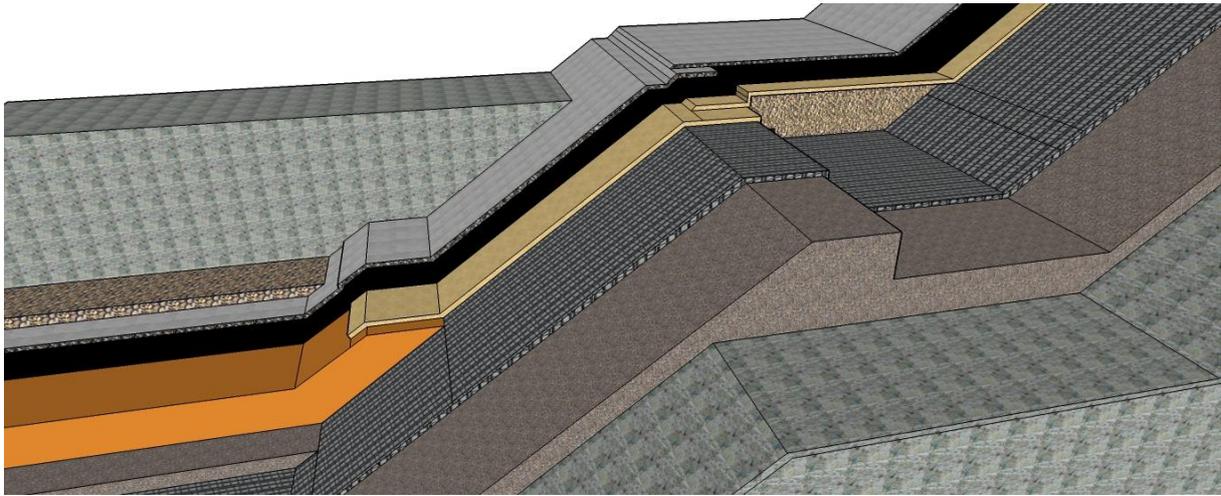


Figure 12 : Extension latérale avec un dispositif d'étanchéité géosynthétique (DEG) et géogrille ancrés en tête et en risberge intermédiaire.

### c) Extension mixte

On combinera dans ce cas les dispositions des deux cas précédents.

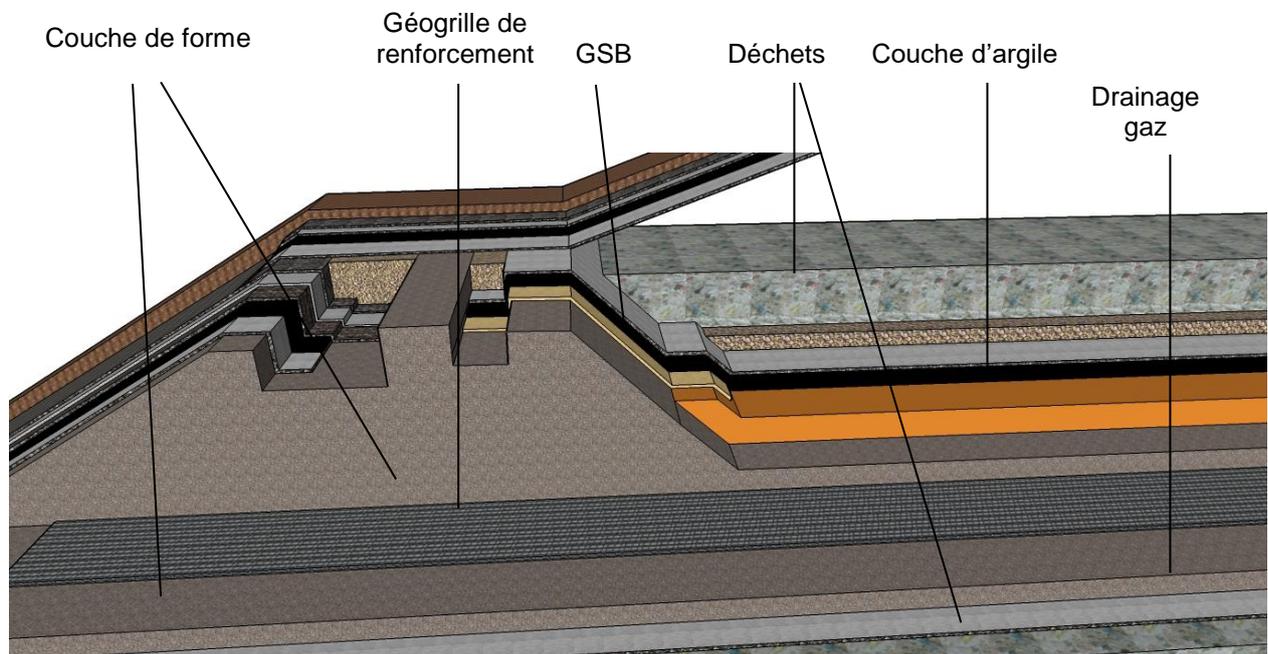


Figure 13 : Digue périphérique d'extension verticale ou sommitale d'un casier avec ancrage de la géogrille sous la digue périphérique.

### 5.4.2. Géomembrane, géosynthétique bentonitique et géocomposite de drainage

Il convient de se conformer aux prescriptions du CFG (Fascicule 11 et 12) pour le dimensionnement et la réalisation de l'ancrage de la géomembrane et du GSB.

Lorsque les sollicitations sont difficilement quantifiables, on peut recourir à un ancrage glissant pour plafonner la sollicitation en traction du dispositif ou tout système permettant de libérer une longueur de géosynthétique supplémentaire.

### 5.4.3. Dispositions spéciales d'ancrage

L'insertion de matériaux naturels frottant entre deux nappes géosynthétiques permet dans certaines conditions d'améliorer les caractéristiques de frottement et d'optimiser ainsi la géométrie de l'ancrage.

On l'envisagera en fond de tranchée d'ancrage où l'insertion d'une couche de 5 cm minimum de matériaux naturels permet de reconstituer une interface sol/géosynthétique en remplacement d'une interface géosynthétique/géosynthétique plus défavorable.

#### Cas d'un ancrage en tranchée

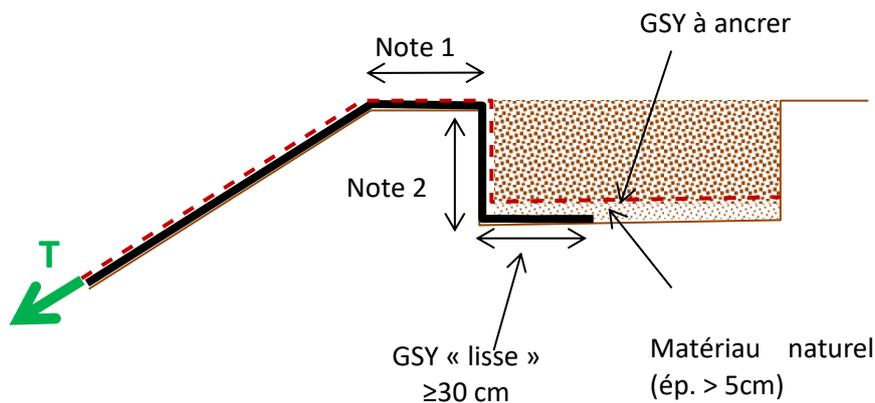


Figure 14 : Géosynthétique (GSY) à ancrer situé au-dessus de l'interface lisse.

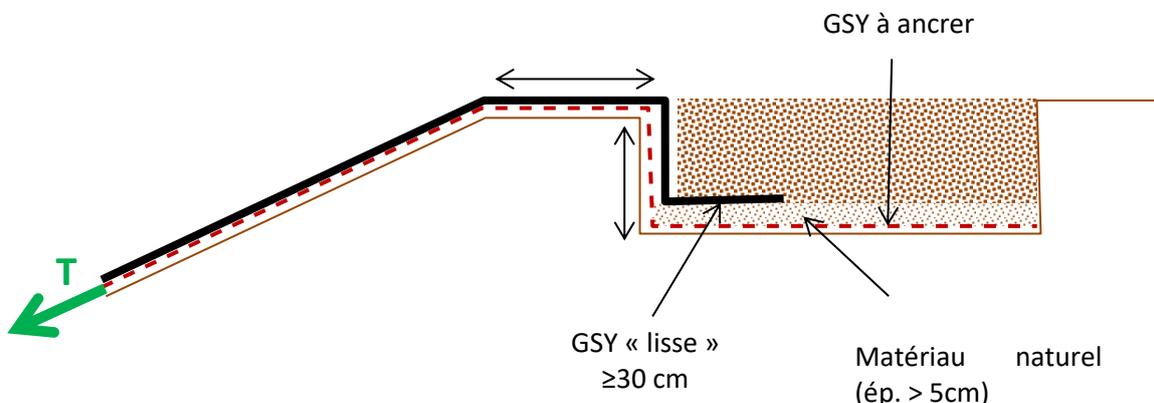


Figure 15 : Géosynthétique (GSY) à ancrer situé sous l'interface lisse.

Note 1 : la distance entre la crête de talus et la tranchée d'ancrage doit être dimensionnée conformément à la NF G 38-067.

Note 2 : la profondeur de tranchée est dimensionnée conformément à la NF G 38-067, elle ne doit pas atteindre le toit des déchets et considérer les exigences réglementaires du code du travail (art. R. 4534-24) relatives aux fouilles en tranchée de profondeur supérieure à 1,30 m.

Cas d'une crête de talus reconstituée

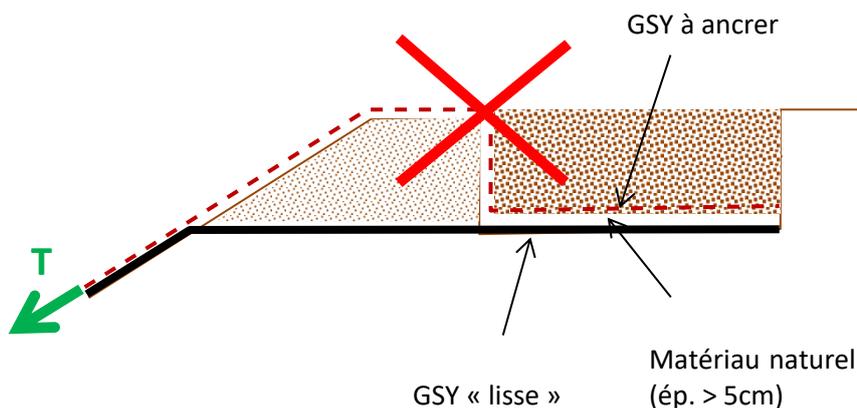


Figure 16 : Ancre par reconstitution de la crête de talus.

La reconstitution d'une crête de talus sur une étanchéité ne permet pas de se rapprocher du fonctionnement d'un ancrage en tranchée traditionnelle, la crête de talus glissant sur une interface étanchéité/géotextile de protection.

Cas des ancrages à plat

L'insertion d'une couche d'interface ne modifie généralement pas les conditions de frottement en sous face du dispositif car un géotextile de protection reconstitue une interface glissante sous la couche de lestage. Il convient d'identifier et de caractériser dans chaque cas l'interface la plus critique.

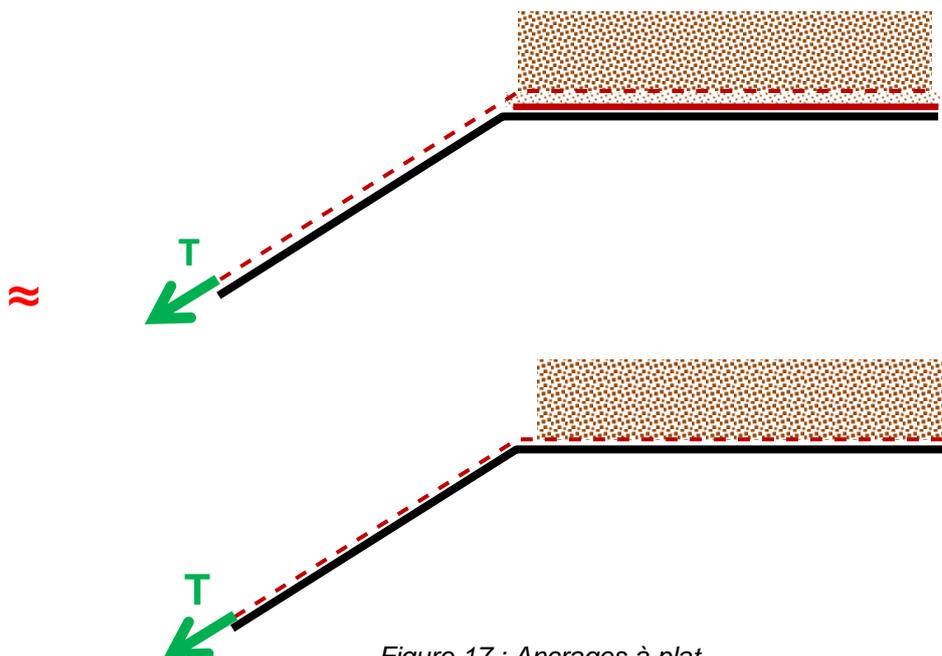


Figure 17 : Ancrages à plat.

Le prolongement de l'ancrage par retournement dans la couche de lestage n'apporte aucun supplément de résistance en ancrage à emprise identique.

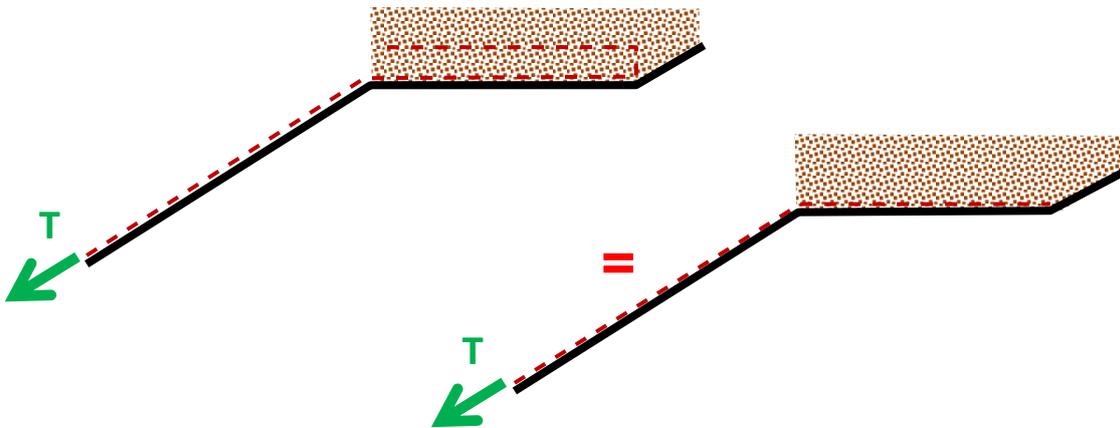


Figure 18 : Ancrage à plat par retournement du géosynthétique.

### **Ancrage plat glissant**

Il s'agit d'un ancrage à plat dont la longueur et le lestage sont définis afin de plafonner les efforts de traction dans le produit ancré. Cet effort de traction est égal à la résistance au glissement de l'ancrage (cf. NF G 38067).

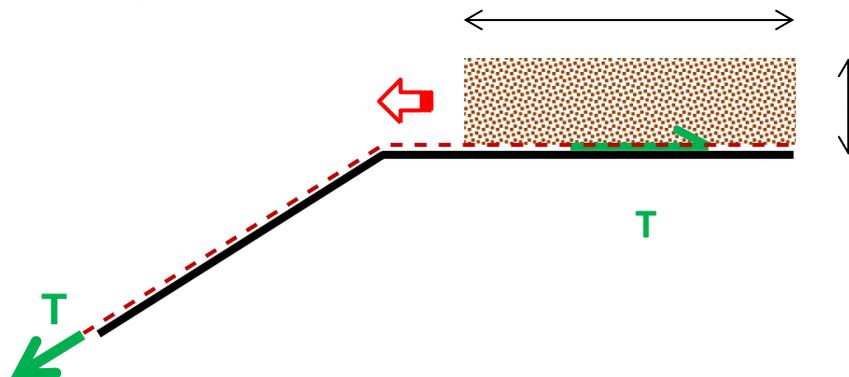


Figure 19 : Ancrage à plat glissant.

### **Ancrage en plan incliné**

Un ancrage en plan incliné vers l'extérieur du casier offre une résistance accrue, il doit cependant être dimensionné en considérant, comme seule interface de glissement, la sous-face la plus glissante du DEG.

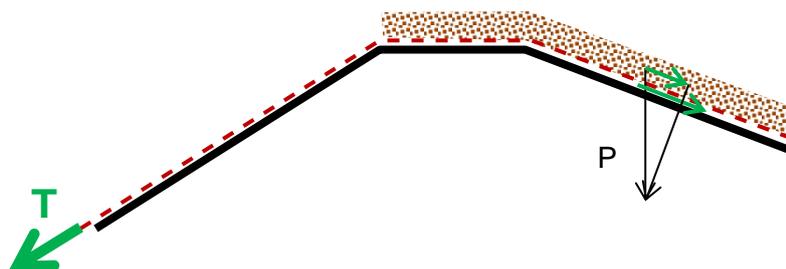


Figure 20 : Ancrage en plan incliné.

## 5.5. GESTION DES FLUIDES

### 5.5.1. Casier existant

L'objectif est de maintenir, voire d'améliorer la fonction de drainage et de collecte des fluides afin de permettre la collecte des fluides résiduels. Les dispositifs en place doivent faire l'objet d'un recensement et d'une étude pour évaluer leur efficacité et la possibilité de les incorporer au système de drainage réhabilité.

Du fait de l'évolution et de la maturation des déchets, mais également de la surcharge attendue par l'extension, une diminution de la perméabilité des déchets existant est attendue. Le drainage et la collecte peuvent donc être affectés par :

- une possible défaillance des systèmes en place liée aux charges et aux contraintes de cisaillement introduites ;
- une efficacité plus faible des systèmes en place liée à la compaction du massif et à la diminution de perméabilité de celui-ci ;
- une difficulté complémentaire à réaliser les interventions éventuelles sur le réseau de drainage et de collecte, de par l'existence de l'extension.

Dans tous les cas les raccordements rigides existants entre les dispositifs de collecte et drainage des fluides et la barrière active devront faire l'objet d'une attention particulière, du fait de défaillances attendues à ces endroits.

#### **a) *Drainage des lixiviats du casier support***

L'état de la production de lixiviats sera vérifié par la réalisation d'un bilan hydrique et le contrôle de la qualité du lixiviat.

Dans le cas d'une extension latérale ou mixte, impactant le réseau de collecte de lixiviats, il sera nécessaire de protéger celui-ci des contraintes de cisaillement ou de le compléter.

En fonction de l'état de saturation du massif, il pourra être nécessaire préalablement aux travaux visant à améliorer les caractéristiques mécaniques du massif, de drainer celui-ci pour atteindre une saturation des déchets plus faible. Cette désaturation pourra être réalisée par pompage actif, accompagnée de drainage périphérique dans le cas d'arrivées latérales. Une reprise de dégradation des déchets peut être observée si ceux-ci ne sont pas suffisamment dégradés lors de la désaturation.

L'évaluation du bilan hydrique après réalisation de l'extension devra permettre de s'assurer du bon dimensionnement du drainage.

Le passage des drains de collecte des lixiviats provenant de l'ancien casier, en particulier au niveau de l'interface avec le nouveau casier (traversée des barrières passive et active), devra être retenu uniquement en cas d'impossibilité de recours à une solution alternative (puits obliques par exemple). Le cas échéant, au droit des traversées, le libre mouvement et le maintien des performances des barrières doivent être assurés. Notamment, une attention particulière devra être apportée au raccord de la géomembrane de la barrière active et des puits (« chaussette » glissante PEHD, double tubage PEHD, ...).

### **b) Drainage des biogaz**

Un estimatif de la production résiduelle de biogaz sera à réaliser pour évaluer s'il est nécessaire de prévoir un captage actif (pompage) du biogaz résiduel. Des valeurs guides sont produites dans le guide Ademe « Biogaz issu de la mise en décharge : comment optimiser son captage ? » (2001). Il est nécessaire de maintenir, de compléter ou de créer une couche horizontale de drainage des gaz pour éviter l'accumulation des biogaz, en particulier lors de la réalisation d'une extension mixte ou verticale.

Dans le cas où un captage actif doit être mis en place, cette couche de drainage doit être associée à un réseau de tranchées drainantes ou de puits complémentaires.

Le biogaz collecté pourra rejoindre le réseau sous dépression de l'extension (captage actif) ou être traité par un dispositif passif (couverture oxydante, fenêtre oxydante, biofiltre).

### **c) Recommandations vis à vis des ouvrages du casier support**

Dans le cas où le casier existant est muni de puits de pompage des lixiviats et/ou de captage des biogaz, on veillera à ce que le sommet de ces ouvrages ne puisse représenter un risque de poinçonnement pour la structure d'interface entre les deux casiers. Au besoin, les têtes de ces ouvrages seront recépées afin de les maintenir sous la cote finale (après tassements) de la base de la couche de forme du casier d'extension.

De plus, des dispositions spécifiques seront prises pour s'assurer que ces puits ne représentent pas de points privilégiés de tassements locaux (comblement, ...).

## **5.5.2. Casier en appui**

### **a) Drainage des lixiviats**

La rehausse va induire un risque complémentaire d'affaissement plus ou loin localisé du système d'étanchéité drainage.

Les incidences de ces affaissements localisés ou globaux sont principalement de deux ordres :

- a. modifications le plus souvent locales des pentes pouvant induire des inversions de pente et le stationnement du lixiviat sur des épaisseurs plus importantes ;
- b. induction de contraintes de traction et de cisaillement au sein des éléments constitutifs du système de drainage.

La définition des pentes initiales du fond de casier d'extension doit prendre en compte les tassements du massif sous-jacent (voir ch.4.2) afin de s'assurer qu'une pente résiduelle minimale de 1 à 2 % subsiste à l'issue de l'ensemble des tassements.

Les modelés initiaux du massif support ainsi que du massif supérieur devront être conçus en ce sens (accentuation ou réduction des pentes initiales, répartition de la charge de déchets).

Du fait de l'induction de contraintes complémentaires dans le système, il est recommandé d'implanter sur les zones les plus stables le point bas du système de collecte des lixiviats (puisard). Il peut de plus s'avérer nécessaire d'appliquer des dispositions constructives particulières au droit de ces points afin d'assurer la pérennité de la fonction (surdimensionnement local du renforcement, double étanchéité, cuvelage, ...).

## **b) Drainage des biogaz**

Le drainage des biogaz va être affecté essentiellement par les risques complémentaires de défaillance du système de collecte des biogaz liés aux tassements différentiels induits. Ceux-ci vont être amortis en partie par le massif de déchets de l'extension. Les risques vont concerner donc essentiellement les puits de collecte montés à l'avancement dans les zones de flexion potentielle, ainsi que les puits mixtes de collecte de biogaz et lixiviats situés dans ces mêmes zones.

Dans le cas d'un drainage actif, le maintien d'une pente minimale dans les collecteurs vers les puits ou des points de collecte de condensats pourra nécessiter une surveillance accrue.

Dans le cas d'un drainage passif ou sous faible dépression (déchets faiblement fermentescibles), le maintien des points hauts sera encore plus important. Du fait de la plus faible génération de biogaz des déchets récents, un placement du système de traitement en point haut pourra permettre de limiter la dépression et donc la puissance nécessaire pour le drainage des biogaz.

Du fait de la mise en place plus rapide des couvertures intermédiaires et finales dans les exploitations récentes, un reprofilage pourra être nécessaire avant la mise en place de celles-ci pour maintenir les pentes de drainage des eaux superficielles et réduire le transfert des eaux météoriques vers le système de drainage des lixiviats.

L'efficacité du système de drainage des biogaz va donc dépendre essentiellement du maintien de l'intégrité du système de collecte de biogaz, de l'efficacité du drainage des lixiviats en partie basse du massif et de l'efficacité de la couverture à réduire les infiltrations météoriques dans la partie haute du massif.

## 6. Stabilité et intégrité structurelle

### 6.1. TYPES D'INSTABILITÉS À ÉVALUER

#### 6.1.1. Stabilité générale ou glissement rotationnel

Les glissements rotationnels concernent les ruptures sous forme de loupes circulaires, logarithmiques, cylindriques ou paraboliques qui peuvent survenir au niveau du massif de déchets s'il présente des caractéristiques mécaniques insuffisantes et/ou une pente trop forte. Ces surfaces de glissement peuvent être soit superficielles et déboucher au niveau du talus extérieur (cercle de talus) ou du pied de talus (cercle de pied) soit plus profondes et affecter également le sol de fondation (cercle profond). Lors de l'évaluation de la stabilité générale, il convient de vérifier les surfaces de rupture potentiellement les plus défavorables avec ces trois types de cercles de glissement.

#### 6.1.2. Stabilité d'interface ou glissement plan

Outre les glissements rotationnels, des glissements plans sont également possibles le long des interfaces des BSA/BSP séparant les anciens déchets des nouveaux déchets lorsque ces dernières présentent des résistances au cisaillement limitées. Ces interfaces dont le nombre se situe typiquement entre trois et six selon le nombre de géosynthétiques (GSY) mis en œuvre, peuvent impliquer 2 GSY (GTX-GMB, GMB-GSB) ou un GSY et un matériau naturel (GTX-graviers, GMB-argile, GSB-argile).

Puisque toutes les interfaces constituent autant de plans de glissement potentiels, la stabilité d'interface doit être vérifiée pour chacune de ces interfaces ou l'interface la plus pénalisante. Il est à noter que les glissements plans représentent une des principales causes d'instabilité en ISDND.

#### 6.1.3. Stabilité au glissement mixte

Dans certains cas, il est possible que la surface de glissement passe simultanément dans les déchets et le long d'une interface. Il convient alors d'envisager ce type de scénario (glissement mixte) lors de l'évaluation de la stabilité de l'extension d'ISDND. Comme pour les glissements rotationnels et plans, l'analyse de la stabilité mixte doit porter sur une série de profils en long représentatifs et potentiellement défavorables.

#### 6.1.4. Maintien de l'intégrité du DEG

Ce volet porte essentiellement sur les géosynthétiques constituant l'interface la moins résistante, en l'occurrence le géotextile (GTX) de protection et la géomembrane (GMB) d'étanchéité :

- GTX : Le GTX glisse sur la GMB et puisqu'il est retenu en tête de talus au niveau de l'ancrage, il se met en traction et peut se déformer considérablement. Il convient alors de vérifier que ces efforts/déformations n'entraînent pas sa rupture. Une rupture du GTX entraînerait non seulement un mouvement brusque du massif de déchets mais également la mise à nue de la GMB qui serait alors sujette au poinçonnement ;
- GMB : une partie des efforts tangentiels induits par les déchets sous-jacents est transmise à la GMB. Le concepteur doit s'assurer que ces efforts transmis restent bien en dessous de la limite d'élasticité du produit.

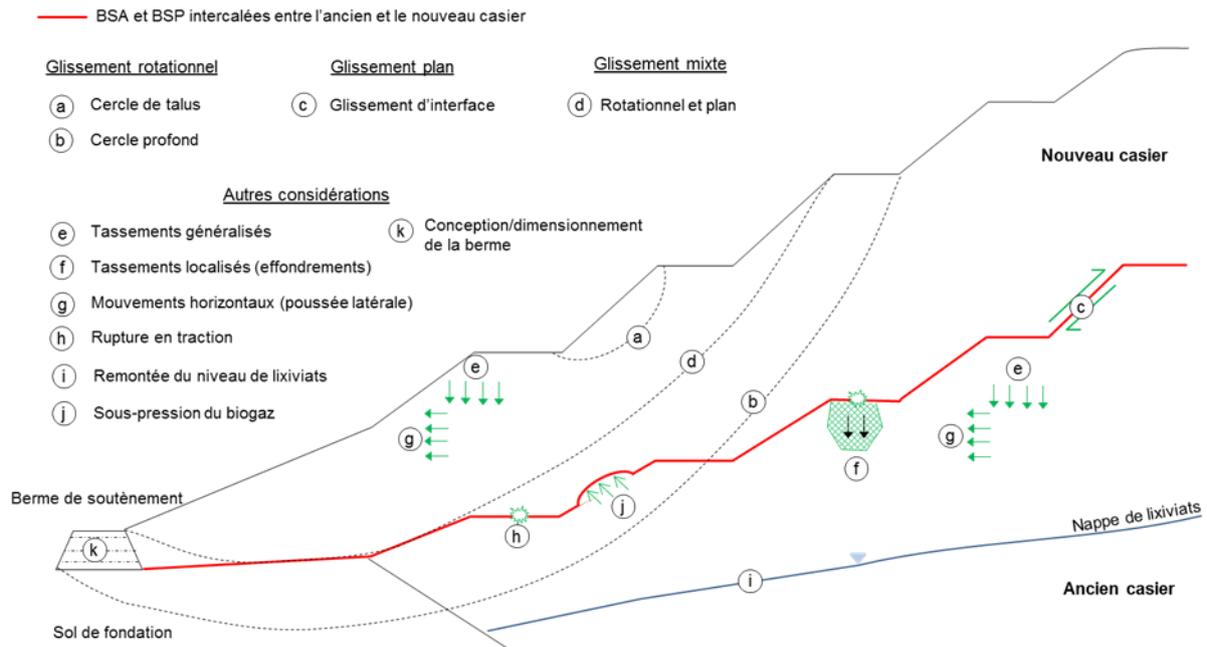


Figure 21 : Instabilités et déformations potentielles d'un projet d'un casier en appui sur des déchets.

## 6.2. MÉTHODES DE CALCUL DE STABILITÉ

Il existe de nombreuses méthodes permettant d'évaluer la stabilité des extensions d'ISDND. Toutefois, ces méthodes peuvent être classées en deux principaux groupes : les méthodes analytiques et les méthodes numériques.

### 6.2.1. Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques sont les méthodes les plus anciennes et couramment utilisées pour l'évaluation de la stabilité générale, d'interface et mixte. Il s'agit entre autres de la méthode des tranches (Bishop par exemple) et de l'équilibre limite sur pente finie (méthode des blocs) ou infinie. Ces méthodes classiques sont relativement simples d'application et sont disponibles dans de nombreux logiciels de calcul.

Les principaux intérêts des méthodes analytiques sont :

- permet une estimation rapide de la stabilité ;
- prise en main relativement aisée ;
- nécessite peu de paramètres de calcul ;
- méthode ancienne et éprouvée sur des cas simples.

## 6.2.2. Méthodes numériques

Comme recommandé par l'Eurocode 7, le recours à la modélisation numérique est possible lorsque les méthodes analytiques ne permettent plus d'identifier le mécanisme de rupture. C'est le cas des extensions d'ISDND qui présentent parfois des géométries complexes et où les interactions sols/déchets/géosynthétiques sont fréquentes.

Les méthodes des éléments finis, des différences finies et des éléments discrets sont les trois principales méthodes numériques utilisées pour l'évaluation de la stabilité. Elles permettent une détermination réaliste et automatique de la surface de rupture et permet ainsi d'évaluer les stabilités rotationnelle, plane et mixte. Dans le cas de déformations non négligeables (pluricentimétriques) la méthode des différences finies est à privilégier.

Les principaux intérêts des méthodes numériques sont :

- meilleure prise en compte du phasage de construction du remblai de déchets (stabilité à différents niveaux et phases critiques du remplissage) ;
- mise en évidence des mécanismes particuliers de rupture notamment la rupture progressive ;
- évaluation des déformations et déplacements des différentes composantes structurelles de l'ouvrage.

## 6.3. ÉLÉMENTS DE CALCUL

Pour l'évaluation de la stabilité, il est nécessaire de disposer d'une géométrie précise des profils à étudier (hauteur, pentes et risbermes), du niveau éventuel de lixiviats dans les anciens et les nouveaux déchets ainsi que les paramètres mécaniques des matériaux présents au niveau de l'ouvrage (déchets, sols) et des interfaces entre GSY.

Dans ce guide, seuls les paramètres de cisaillement des déchets et des interfaces ainsi que les moyens d'obtention de ces paramètres, sont présentés.

### 6.3.1. Paramètres de cisaillement des déchets

La cohésion ( $c$ ) et l'angle de frottement ( $\phi$ ) des déchets peuvent varier de manière considérable d'un site à un autre et au sein d'un même site. En effet, différents facteurs peuvent influencer la résistance au cisaillement des déchets entre autres la composition des déchets, l'état de dégradation, la contrainte verticale appliquée, l'état de déformation, l'hétérogénéité, etc.

Les paramètres de cisaillement ( $c$ - $\phi$ ) des déchets peuvent être acquis par trois approches :

- analyse bibliographique : les valeurs tirées de la bibliographie doivent être représentatives du type de déchets (ménagers, % de plastiques, etc.) et des conditions réelles (contraintes normales, etc.) existants au niveau du site étudié ;
- analyse rétrospective : détermination des paramètres de cisaillement à partir des profils les plus pénalisants du massif existant, dont la stabilité est démontrée ;
- caractérisation en laboratoire : en complément des deux approches précédentes, des essais de caractérisation mécanique des déchets en laboratoire à l'aide de boîtes de cisaillement ou de cellules triaxiales peuvent être également réalisés. Dans ce cas, les échantillons testés devront être impérativement représentatifs du massif de déchets (composition, etc.).

### 6.3.2. Paramètres de cisaillement des interfaces

Le long d'une interface impliquant un géosynthétique, la résistance au cisaillement dépend du type de géosynthétique (texturé, lisse, non-tissé, extrudé, etc.), de l'humidité de l'interface (humide, sec), de la contrainte de confinement ainsi que du niveau de déplacement relatif atteint (Criley et Saint John, 1997, Koerner et Koerner, 2001, Stoewahse *et al.*, 2002, McCartney *et al.*, 2004).

Les paramètres de cisaillement d'interface ( $c^3-\emptyset$ ) peuvent être également déterminés à partir des trois approches suivantes :

- analyse bibliographique : les valeurs tirées de la bibliographie doivent être représentatives des types d'interface (lisse, texturée, nature des géosynthétiques impliqués, etc.) et des conditions réelles (contraintes normales, humidité des interfaces, etc.) existants au niveau du site étudié. Ce type d'approche pourra être utilisé en avant-projet ;
- analyse rétrospective : détermination des paramètres de cisaillement à partir des profils les plus pénalisants du massif existant, dont la stabilité est acquise ;
- caractérisation en laboratoire : les caractéristiques d'interfaces peuvent être déterminées selon la méthode du plan incliné (NF EN ISO 12957-2) pour des contraintes normales de confinement inférieures à 15 kPa ou selon la méthode de la boîte de cisaillement (NF EN ISO 12957-1) pour des contraintes normales supérieures à 15 kPa. Les conditions d'essai doivent être représentatives des conditions réelles de terrain ; à titre d'exemple, l'interface GMB-GTX doit être humidifiée pour tenir compte de la présence des lixiviats et de déchets humides en fond d'ISDND.

Dans tous les cas, il est plus sécuritaire de retenir les caractéristiques résiduelles (long terme et grands déplacements). Par ailleurs, pour des raisons de sécurité et puisque que les interfaces entre géosynthétiques ne devraient théoriquement pas présenter de résistance au cisaillement sous confinement nul, une cohésion des interfaces nulle entre géosynthétiques est retenue. Le présente quelques couples de valeurs ( $c-\emptyset$ ) d'interfaces impliquant des géosynthétiques.

Type d'interface	$c_{pic}$ (kPa)	$\emptyset_{pic}$ (°)	$c_{rés}$ (kPa)	$\emptyset_{rés}$ (°)	Précisions	Références
GTX-GMB sec	ND	12,5	ND	9	ND	Seed <i>et al.</i> (1988)
GTX-GMB humide	ND	10,4	ND	8	ND	
GTX-GMB	ND	14	ND	12	ND	Byrne <i>et al.</i> (1992)
GTX-GMB	0	8,5	0	6	Cisaillement annulaire	Stark and Poeppel (1994)
GTX-GMB	1,4	11	ND		Cisaillement direct : 0,3x0,3 m	Reddy <i>et al.</i> (1996)
GTX-GMB	ND		0	12	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 2 mm.	Villard <i>et al.</i> (1999)

<sup>3</sup> Dans le cas des interfaces entre géosynthétiques, C est pris égal à 0

Type d'interface	$c_{pic}$ (kPa)	$\phi_{pic}$ (°)	$c_{rés}$ (kPa)	$\phi_{rés}$ (°)	Précisions	Références
GTX-GMB PEHD sec	0	7,76	0	7,41	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 50 mm.	Bergado <i>et al.</i> (2006)
GTX-GMB PEHD humide	0	9,46	0	8,96		
GTX-GMB PEHD	0,4	11,7	0,4	9	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 80 mm.	Fownes <i>et al.</i> (2008)
GTX-GMB	ND		5	12,8	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 90-100 mm.	Chen <i>et al.</i> (2010,2011)
GMB-GSB humide	0	6,49	0	6,49	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 50 mm.	Bergado <i>et al.</i> (2006)
GMB-GSB sec	0	8,93	0	8,93		
GMB-GSB	ND		11,4	23,6	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 90-100 mm.	Chen <i>et al.</i> (2011)
GMB-GSB humide	0	20,9	5	9,3		
GMB-GSB sec	0	24,4	0	16,9		
GMB-argile	ND		0	9	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 2 mm.	Villard <i>et al.</i> (1999)
GMB-argile, non drainé	31	7,6	3,2	25,1	Cisaillement direct	Zamar <i>et al.</i> (2014)
GMB-argile, drainé	8	22	8	22		
GTX-sol granuleux	ND		0	29	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 2 mm.	Villard <i>et al.</i> (1999)
GTX-déchets	4,4	29,9	3,3	29,8	Cisaillement direct : 0,3x0,3 m. Déplacement : 80 mm.	Fownes <i>et al.</i> (2008)
GTX-sable sec	6,3	29,9	1,8	29,6	Cisaillement direct	Zamara <i>et al.</i> (2014)
GTX-sable humide	3,2	29,9	1,3	29,6		
Déchets-sable	5	20	5	20		
Géogrille-granulats	0	48	ND		Cisaillement direct	Bakeer <i>et al.</i> (1998)
Géogrille-concassé	0	31-54	ND		Cisaillement direct	Baykal et Dadasbilge (2008)

Tableau 5 : Quelques valeurs de cohésion et d'angle de frottement des interfaces (tiré de Tano *et al.*, 2016).

## 6.4. SITUATIONS, SOLLICITATIONS ET COMBINAISONS DE CALCULS

Lorsque la stabilité est évaluée à partir des méthodes analytiques, les calculs justificatifs doivent être conduits à court et long terme selon les situations de projets transitoires, accidentelles, durables et sismiques (Eurocode 7).

### 6.4.1. Situations de calcul

#### a) *Stabilité à court terme*

Lors de l'exploitation des casiers, il convient de vérifier la stabilité de l'extension d'ISDND idéalement à chaque phase d'exploitation ou a minima pour la situation la plus défavorable. Pour cela, les phases de d'exploitation doivent être définies et les profils les plus défavorables identifiés avant la justification de la stabilité.

Ces évaluations de stabilité à court terme doivent concerner les situations suivantes :

- les situations de projet transitoires qui se réfèrent à des conditions temporaires applicables à l'ouvrage, par exemple en cours d'exploitation ou lors d'un stockage temporaire de matériaux en tête de talus, etc. ;
- les situations de projet accidentelles qui se réfèrent à des conditions exceptionnelles applicables à l'ouvrage (hauteur exceptionnelle de lixiviats par exemple) ;
- les sollicitations sismiques.

#### b) *Stabilité à long terme*

Après l'exploitation de l'extension d'ISDND (à long terme), il s'agira de vérifier que l'ouvrage restera stable durant toute son existence. Cette vérification passe par l'évaluation de la stabilité pour les situations suivantes :

- les situations de projet durables (permanent) ;
- les situations de projet accidentelles ;
- les sollicitations sismiques.

Pour cette analyse à long terme, il convient de prendre en compte l'évolution de la géométrie du site, de la qualité des matériaux naturels et synthétiques, et des déchets. Une prise en compte de conditions pénalisantes à évaluer au cas par cas selon les caractéristiques du site (exemple : formation d'un horizon saturé en lixiviats dans les déchets anciens / nouveaux) est également possible afin de pouvoir garantir la stabilité du massif de déchets, y compris en phase de post-exploitation ou en cas de drainage perturbé (colmatage).

Dans tous les cas (court terme et long terme), le choix des situations de calcul devra être défini conformément aux dispositions du paragraphe 2.2 de la norme NF EN 1997-1 (Eurocode 7).

### 6.4.2. Sollicitations et combinaisons de calculs

Pour la définition des actions et des cas de charges à considérer pour les calculs de stabilité, deux approches sont souvent considérées :

- approche traditionnelle : elle consiste à utiliser des valeurs de paramètres de résistance sécuritaires sans facteur de sécurité partiel et sans pondération et majoration des actions déstabilisatrices. Dans ce contexte, il est généralement admis que la stabilité est vérifiée lorsque le facteur de sécurité est supérieur à 1 pour un événement exceptionnel (séisme, ...), supérieur à 1,3 en période d'exploitation et supérieur à 1,5 à long terme (post-exploitation et au-delà) ;
- approche Eurocode 7 (NF EN 1997-1) : dans cette approche les paramètres caractéristiques de résistance sont minorés grâce à des facteurs partiels. Les effets des actions déstabilisatrices sont quant à elles majorées par d'autres facteurs partiels. Ces facteurs partiels correspondant aux cas de charge, dépendent du type de situation de calcul (permanent, variable, accidentelle) et de l'état limite (ultime ou service) retenus pour les calculs. À partir de ces cas de charge, trois types de combinaisons d'actions peuvent être considérés. Ce sont les combinaisons fondamentales (pour les situations de projet durables et transitoires), les combinaisons accidentelles (pour les situations de projet accidentelles) et les combinaisons sismiques (pour les sollicitations sismiques).

### 6.5. Efforts et déformations induits dans les géosynthétiques par les déchets sus-jacents

Pour l'évaluation de la répartition des efforts/déformations dans chaque couche de géosynthétique, le concepteur peut recourir à modélisation numérique qui permet de prendre en compte l'interaction entre les différents géosynthétiques. Il est également possible de se rapporter à des méthodes analytiques par calcul empirique qui se basent sur la différence entre la contrainte de cisaillement au-dessus du GSY et la résistance au cisaillement sous le géosynthétique.

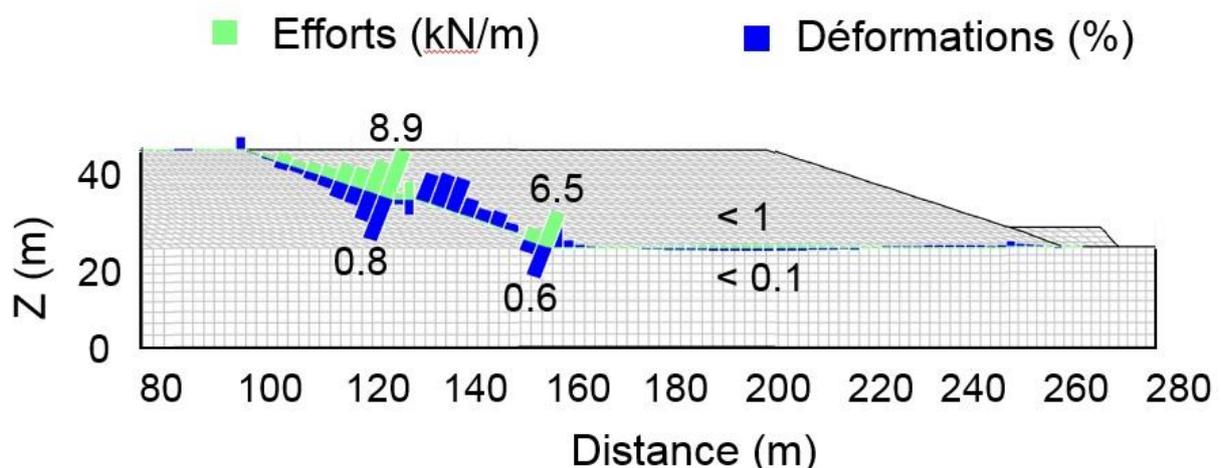


Figure 22 : Exemple de distribution des efforts et déformations le long d'une interface géosynthétique en barrière de fond de casier d'extension.

## 6.6. ACTIONS POUR L'AMÉLIORATION DE LA STABILITÉ

Lorsque la stabilité n'est pas vérifiée par le calcul, certaines actions peuvent contribuer à l'amélioration. Ces actions à mener peuvent porter sur :

- la géométrie par modification du profil :
  - adoucissement des pentes des talus intérieures et extérieures,
  - mise en œuvre de risbermes au niveau des talus,
  - diminution de la hauteur de déchets ;
- les forces mécaniques :
  - adaptation des ouvrages de soutènement en pied de talus extérieur,
  - mise en œuvre d'une couche de renforcement (géogrille, géotextile, ...) à l'interface entre les déchets et la barrière active ;
- le comportement du support : consolidation du terrain naturel ou du massif de déchets support dans le cas des cercles de glissement profond ;
- le régime hydraulique : amélioration du drainage et rabattement de la nappe afin de réduire les pressions interstitielles.

## 7. Suivi et instrumentation

### 7.1. OBJECTIFS DU SUIVI

Le suivi topographique annuel du massif de déchets est une obligation réglementaire à laquelle doivent souscrire les exploitants d'ISDND. Dans le cas précis des extensions en appui, le suivi topographique doit permettre de :

- contrôler la déformation en grand de l'ensemble du massif ainsi que d'éventuelles dérives par rapport aux estimations ;
- contrôler la déformation du massif de déchets sous-jacents et plus particulièrement de l'interface entre le massif ancien et le nouveau massif ;
- s'assurer que les déformations mesurées ne remettent pas en cause l'intégrité des dispositifs d'étanchéité et de drainage ;
- le cas échéant, reprendre les calculs d'estimation des tassements, voire modifier les conditions d'exploitation du casier (phasage, géométrie).

Le suivi topographique doit être réalisé en phase d'aménagement, d'exploitation et de post-exploitation des casiers de l'extension.

### 7.2. MÉTHODES DE SUIVI DE L'ÉVOLUTION EN GRAND DU MASSIF

Les techniques de suivi de l'évolution en grand du massif de déchets sont décrites en détail dans le « Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de classe II » (ADEME, 2005). Le tableau suivant synthétise les avantages et inconvénients de ces techniques.

Technique	Principe	Applicable en phase :	Avantages	Inconvénients
Tachéomètre électronique	Combine les fonctions d'un théodolite et d'un distance-mètre. Permet de déterminer les coordonnées spatiales du point mesuré.	Travaux Post-exploitation	Très répandue Coût Précision	Repères fixes Nombre de points limité
GPS différentiel	Basé sur la triangulation d'au moins 4 signaux GPS satellites. Permet de déterminer les coordonnées spatiales du point mesuré.	Travaux Post-exploitation	Précision Coût	Traitement des données Nombre de points limité

Technique	Principe	Applicable en phase :	Avantages	Inconvénients
Scanner et radar laser 3D	Basé sur le temps de parcours d'un laser.	Travaux Exploitation Post-exploitation	Précision Densité des points de mesure Rapidité	Encore peu répandue Coût Traitement des données
Station GPS sur engin (compacteur)	Une station GPS embarquée mesure régulièrement la position de l'engin.	Travaux Exploitation	Suivi en continu Applicable en exploitation	Traitement des données Coût de l'équipement par engin

Tableau 6 : Synthèse des méthodes de suivi en grand de l'évolution géométrique du massif de déchets.

### 7.3. Méthodes de suivi des déformations des barrières

Parmi les méthodes disponibles pour le suivi des déformations de l'interface entre casier support et nouveau casier, on privilégiera les dispositifs permettant d'acquérir des mesures spatialement continues pour un profil donné.

#### 7.3.1. Profilomètres à torpille

Il s'agit de tubes souples en PEHD que l'on peut installer de manière subhorizontale à l'interface entre le casier ancien et le nouveau casier (couche de forme).

Une torpille de mesure, dotée d'un dispositif hydrostatique ou accélérométrique, est tirée d'une extrémité à l'autre du tube et permet de mesurer les déformations verticales de celui-ci.

Ce dispositif est relativement peu coûteux, et présente l'avantage de pouvoir réaliser des profils de mesures continus. Les déformations acceptées par le tube sont de l'ordre de quelques mètres, avec une précision de mesure d'environ 0,5 à 1 cm selon la technologie de la sonde. Toutefois, ce type de dispositif nécessite un accès en 1 ou 2 points à flanc de casier.

Notons que ce dispositif peut également être disposé en couverture, pour suivre la déformation globale du massif de déchets.

Applicable en phase :	Avantages	Inconvénients
Travaux Exploitation Post-exploitation	Précision des mesures Profils continus Pas d'incidence sur l'exploitation	Accès latéral

Tableau 7 : Avantages et inconvénients du profilomètre à torpille.

### 7.3.2. Tassomètres hydrostatiques

Les tassomètres sont couramment utilisés en génie civil pour le suivi de l'évolution des remblais. Leur fonctionnement est généralement basé sur le principe des vases communicants. La mesure est réalisée en connectant les tubulures (eau et gaz) du tassomètre, débouchant sur le flanc de l'ouvrage, à un tableau de mesure.

Il est envisageable de disposer des tassomètres dans la couche de forme du casier supérieur, afin de suivre l'évolution des déchets du casier inférieur. Ces dispositifs sont nécessairement limités en nombre. Les tubulures de raccordement, qui doivent déboucher à flanc de casier, doivent également résister aux contraintes de la mise en œuvre des matériaux, ainsi qu'aux déformations du massif de déchets.

Applicable en phase :	Avantages	Inconvénients
Travaux	Technique éprouvée	Densité des points de mesure
Exploitation	Pas d'incidence sur l'exploitation	Fragilité des flexibles et des connexions sous effort
Post-exploitation		

Tableau 8 : Avantages et inconvénients du profilomètre des tassomètres hydrostatiques.

### 7.3.3. Inclinomètre horizontal à demeure

De conception et de mise en œuvre proche du profilomètre à torpille, ce dispositif en diffère par la présence, au sein du tubage, de sondes inclinométriques régulièrement espacées et laissées à demeure dans le tube.

Il accepte ainsi des déformations locales (points d'inflexion) plus importantes que le profilomètre et permet de s'affranchir de l'accès latéral.

Applicable en phase :	Avantages	Inconvénients
Travaux	Précision des mesures	Coût
Exploitation	Mise en place	
Post-exploitation	Pas d'incidence sur l'exploitation	

Tableau 9 : Avantages et inconvénients de l'inclinomètre horizontal.

### 7.3.4. Fibres optiques

Les fibres optiques permettent de mesurer de nombreux paramètres, parmi lesquels la déformation (élongation, courbure) et la température.

Deux types d'effets spécifiques aux fibres optiques permettent de mesurer une déformation :

- effet Bragg : mesure réalisée par des capteurs ponctuels (une dizaine maximum) distribués le long de la fibre ;
- effet Brillouin : mesure continue le long de la fibre, pas de mesure réglable (de l'ordre du mètre).

Les fibres optiques peuvent être directement intégrées dans la couche de forme ou la barrière passive reconstituée. Elles devront être protégées des agressions mécaniques du milieu.

Les fibres optiques peuvent également être incluses dans les nappes de géosynthétiques (géotextiles de protection, de renforcement, géogrilles) dès la fabrication. Dans le cas des géosynthétiques de renforcement, elles permettent donc une mesure directe des déformations subies par ceux-ci.

Les fibres optiques sont peu coûteuses, ce qui permet d'envisager une couverture dense des fonds de casiers. Par contre, les dispositifs de mesure nécessaires à leur utilisation (boîtiers émetteurs-récepteurs) présentent un coût non négligeable. L'interprétation des données demande également l'intervention d'un spécialiste.

Applicable en phase :	Avantages	Inconvénients
Travaux	Précision des mesures	Coût (boîtiers)
Exploitation	Mise en place	Interprétation des données
Post-exploitation	Densité de mesure	
	Redondance	
	Pas d'incidence sur l'exploitation	

Tableau 10 : Avantages et inconvénients des fibres optiques.

### 7.3.5. Extensomètre magnétiques de forage

Ce dispositif permet de mesurer des déformations verticales aux abords d'un forage. Il est constitué d'éléments mobiles (plaques, anneaux) dotés d'aimants, glissants sans frottement autour d'un tubage fixe. La position de ces repères mobiles est mesurée depuis la tête de forage grâce à une sonde analogue à une sonde piézométrique, mais dotée de capteurs magnétiques. La précision de ce dispositif est de l'ordre de quelques millimètres.

On distingue trois types d'extensomètre de forage :

- extensomètre à plaque : des plaques en PVC dotées d'aimants sont disposées régulièrement à l'avancement de l'élévation du massif de déchets, et coulisse autour d'un tubage qui est également allongé au cours des travaux (si implanté dans le massif support et la barrière passive) et/ou de l'exploitation du casier (suivi des déformations du nouveau casier) ;
- extensomètre à anneaux à ressorts : ce dispositif est mis en place à la fin des travaux ou de l'exploitation. Le tube interne est disposé dans un forage, puis les anneaux magnétiques, dotés de griffes ressorts, sont glissés sur ce tube, et les ressorts sont déployés une fois la cote désirée atteinte ;
- extensomètre à gaine souple : des anneaux aimantés sont préinstallés le long d'une gaine annelée souple, celle-ci coulissant autour d'un tubage interne rigide. Le contact gaine/déchets est assuré par un mortier liquide.

Ces dispositifs offrent l'avantage d'un suivi des déformations par couches de matériaux, sur tout ou partie de l'épaisseur du massif de déchets. Toutefois, ils ne permettent pas une densité surfacique importante de points de mesure et peuvent représenter, en fonction de la technologie retenue et de l'objet suivi (massif support, barrière passive, nouveau massif) une gêne pour l'exploitation du nouveau casier.

Applicable en phase :	Avantages	Inconvénients
Exploitation	Précision des mesures	Densité surfacique faible
Post-exploitation	Répartition des tassements selon la profondeur	Phasage de mise en place Gêne pendant l'exploitation

Tableau 11 : Avantages et inconvénients des extensomètres de forage.

## 7.4. Méthodologie de contrôle

### 7.4.1. Implantation des points de contrôle de l'interface

Le maillage (densité et répartition) des points de contrôle dépend directement de l'emprise et de la géométrie du projet, des déformations attendues pour le massif de déchets support et des techniques de mesure utilisées.

A minima, le premier casier d'extension d'un projet sera équipé d'un ou plusieurs des dispositifs suivants, par unité de surface de 5 000 m<sup>2</sup> :

- équipements de mesures continues, à privilégier :
  - profilomètre à torpille : 2 profils intégrant les points critiques identifiés lors de l'étude de tassements, 1 point de mesure par mètre,
  - Fibre optique : 2 profils par casier les points critiques identifiés lors de l'étude de tassements. La mesure devra prendre en compte l'effet de la température sur la précision de la mesure de déformation ;
- équipements de mesure ponctuelle, en cas d'impossibilité de mise en place des solutions précédentes :
  - tassomètre : 2 profils composés d'une cellule tous les 20 mètres en zone courante, et d'une cellule ou plusieurs cellules au droit des points critiques,
  - extensomètre à plaque enterrée: 4 à 6 points par casier.

Ils pourront être adaptés sur les casiers ultérieurs, en fonction des résultats acquis sur l'ensemble de la période d'exploitation du premier casier, et des spécificités des futurs casiers.

### 7.4.2. Fréquence des contrôles

#### a) *Suivi topographique externe*

Le suivi topographique peut-être initié, selon les méthodes mises en œuvre, dès la phase de travaux ou la phase d'exploitation du casier.

A minima, si le casier est subdivisé en alvéoles, le suivi topographique spécifique à l'extension devra démarrer à la fin du remplissage de la première alvéole.

La fréquence des contrôles varie en fonction de la phase où se trouve le casier (travaux, exploitation, post-exploitation), de la hauteur finale de déchets, de la vitesse de remplissage.

Les fréquences suivantes sont un minimum afin d'assurer un suivi topographique exploitable du nouveau casier :

- phase travaux : une mesure préalablement à la mise en place de la barrière passive reconstituée, une mesure à l'issue de la mise en œuvre du massif drainant ;
- phase de remplissage : une évaluation trimestrielle de la hauteur du massif de déchets, un relevé topographique intégral du casier (déchets, digues et puits) à l'issue du remplissage ;
- après remplissage du casier : un relevé annuel, prenant en compte l'évolution de la géométrie du dôme, des talus et des points singuliers. Sur talus, on privilégiera un suivi sur repères fixes permettant un suivi de l'évolution sur une base tridimensionnelle.

***b) Suivi des tassements à l'interface des massifs supports et nouveaux***

Les fréquences de suivi des tassements du massif support suivantes, seront appliquées :

- phase travaux : une mesure initiale de calage à la mise en place du dispositif de mesure, une mesure à l'issue de la mise en place du massif drainant ;
- phase de remplissage : une mesure à la fin du remplissage et à minima tous les ans ;
- après remplissage du casier : une mesure annuelle, concomitante au lever topographique, pendant une période de 5 ans, qui pourra être prolongée si les observations révèlent des anomalies par rapport aux estimations de tassement initiales.



## 8. Références citées

- ADEME** (2001) - Biogaz issu de la mise en décharge : comment optimiser son captage ?
- ADEME** (2005) - Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de Classe II.
- AFNOR** (2003) - NF EN 1990. Eurocodes structuraux. Bases de calculs des structures.
- AFNOR** (2005) - NF EN 1997-1. Eurocode 7 : calcul géotechnique. Partie 1 : règles générales.
- AFNOR** (2005) - NF EN ISO 12957-1. Géosynthétiques - Détermination des caractéristiques de frottement - Partie 1 : essai de cisaillement direct.
- AFNOR** (2005) - NF EN ISO 12957-1. Géosynthétiques - Détermination des caractéristiques de frottement - Partie 2 : essais sur plan incliné.
- AFNOR** (2006) - NF EN 1997-1/NA. Eurocode 7 : calcul géotechnique. Partie 1 : règles générales. Annexe nationale à la NF EN 1997-1 :2005.
- AFNOR** (2009) - BP X30-438- Déchets- Guide de bonnes pratiques pour les reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques des sites d'installation de stockage de déchets (novembre 2009).
- AFNOR** (2016) - PR NF G 38-067 - Géosynthétiques, géotextiles et produits apparentés - Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente - Justification du dimensionnement et éléments de conception.
- Arrêté Ministériel du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux.
- Article R. 4534-24 - Code du Travail (Décret n°2008-244 du 7 mars 2008).
- Comité Français des Géosynthétiques** (1995) - Fascicule 11 : Recommandations générales pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets.
- Comité Français des Géosynthétiques** (1998) - Fascicule 12 : Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques.
- Comité Français des Géosynthétiques** (2011) - Fascicule 13 : Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets.
- Criley, K. R. & Saint John, D.** (1997) - Variability analysis of soil vs. geosynthetic interface friction characteristics by multiple direct shear testing. Proceedings of Geosynthetics '97, Long Beach, CA, pp. 885–897.
- Grisolia, M., Napoleoni, Q. & Tancredi, G.** (1995) - The use of triaxial tests for the mechanical characterization of MSW. In: Proceedings of the 5th Sardinia International Landfill Symposium, S. Margherita Di Pula, Cagliari, Vol. II, pp. 761–768.
- Koerner, R. M. & Koerner, G. R.** (2001) - Geosynthetics design beyond factor of safety: risk assessment using probability of failure analysis. Proceedings GRI-15, Hot Topics in Geosynthetics-II, December 2001, Houston, TX, pp. 235–253.

**McCartney, J. S., Zornberg, J. G., Swan, R. H. Jr et al.** (2004) - Reliability-based stability analysis considering GCL shear strength variability. *Geosynthetics International*, 11, No. 3, 212–232.

**Olivier F.** (2003) - Tassement des déchets en CSD de classe II : du site au modèle. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 325 p.

**Seeger, S., and Müller, W.,** (1996) - “Limits of Stress and Strain: Design Criteria for Protective Layers for Geomembranes in Landfill Liner Systems”, *Proceedings Geosynthetics: Applications, Design and Construction*, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 153-157.

**SETRA** (1992) - Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique.

**Stoewahse, C., Dixon, N., Jones, D. R. V et al.** (2002) - Geosynthetic interface shear behaviour: Part 1 test methods, *Ground Engineering*, 35, No. 2, 35–41.

**Tano F., Dias D., Fowmes G., et al.** (2016) - Numerical modelling of the nonlinear mechanical behaviour of multi-layered geosynthetics system: application to a piggy-back landfill expansion, In *Geotextile and Geomembrane*, Vol. 44, pp. 782 – 798.

## **Annexe 1**

# **Compactage dynamique**



Le compactage dynamique est un procédé parfois utilisé pour les déchets avec trois types d'objectifs (Olivier, 2003) :

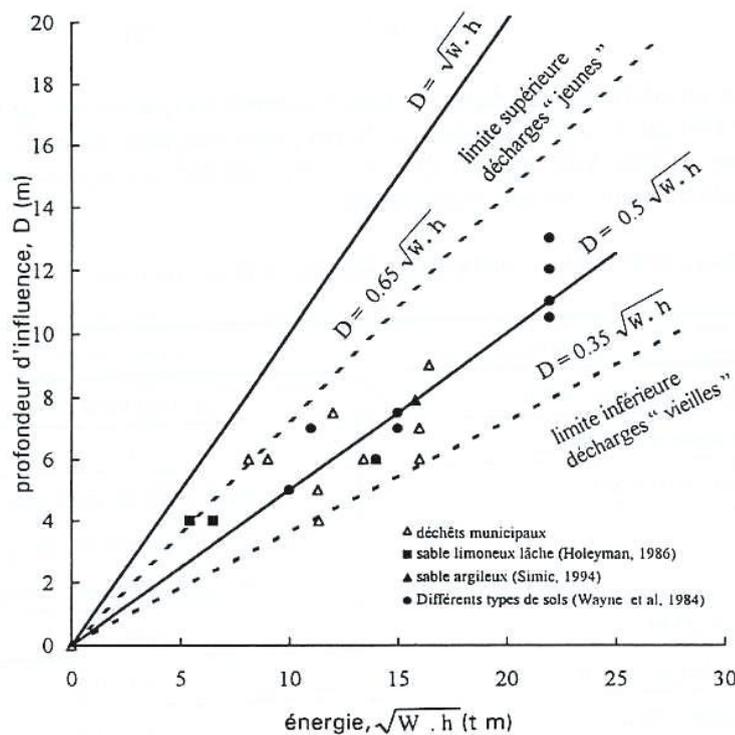
- limiter l'amplitude totale des tassements et maîtriser leur évolution dans le temps de manière à éviter tout risque de rupture / poinçonnement de la couche d'étanchéité de couverture sous l'effet des tassements différentiels (notamment dans le cas d'une extension verticale de casier) ;
- consolider les couches de déchet en place.

La technique consiste à quadriller une zone de stockage de déchets et d'appliquer à intervalles réguliers une contrainte dynamique verticale sous la forme de la chute libre d'un pilon de 6 à 30 tonnes d'une hauteur de 10 à 30 m. L'énergie transmise aux déchets à chaque impact est de l'ordre de 140 à 300 t.m / m<sup>2</sup>. 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 moyenne 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 d'1 m à 2,5 m maximum. La profondeur d'influence varie comme la racine carrée de l'énergie mise en jeu, la loi de dissipation faisant intervenir le carré de la profondeur.

$$D = n \cdot \sqrt{W \cdot h}$$

où

- n est un coefficient d'adaptation tenant compte du type de sol, de la forme du pilon, etc. compris entre 0,35 (déchets vieux) et 0,65 (déchets jeunes) ;
- W représente la masse du pilon (tonnes) ;
- h représente la hauteur de chute (m).



Relation énergie surfacique – profondeur d'influence du compactage dynamique (Van Impe et Bouazza, 1996).

Les paramètres du compactage, à savoir l'espacement entre les impacts, le nombre de coups par impact, le nombre de passes de compactage, ..., sont déterminés sur site en fonction de différents essais de contrôle (essais de calibration, mesures de tassements, contrôles des caractéristiques mécaniques du sol par essais in situ, ...). Le compactage est poursuivi jusqu'à l'obtention des résultats voulus, nécessitant en général plusieurs passes, dont la dernière est exécutée par empreintes jointives de façon à traiter la partie supérieure du terrain.

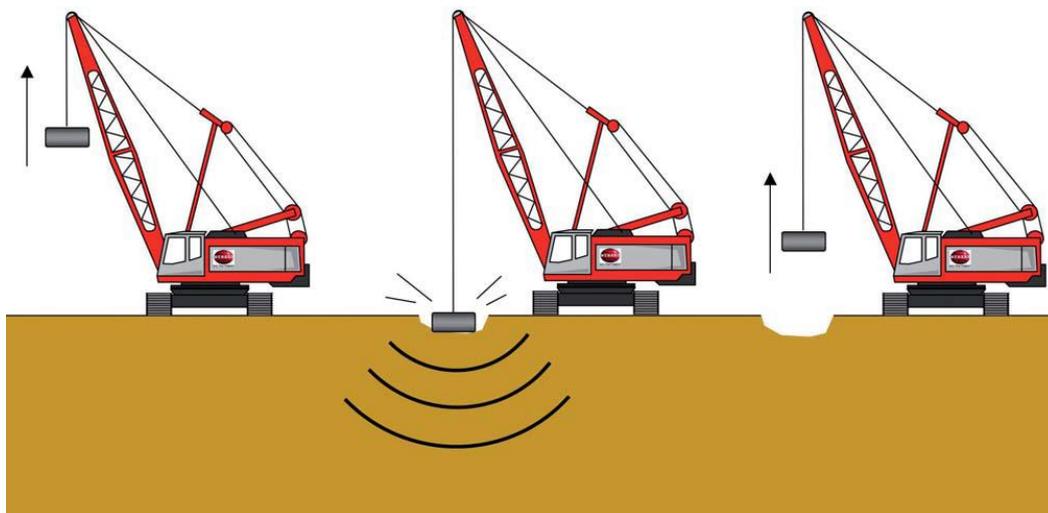
L'efficacité du compactage dynamique est contrôlée par l'intermédiaire de mesures réalisées avant, pendant et après l'opération de compactage. Il est possible de réaliser des essais de caractérisation en place (pressiomètre), des essais de chargement couplés à un suivi des tassements, des mesures de pression interstitielle et enfin des analyses spectrales des ondes de surface (SASW) qui à travers le calcul d'un module de cisaillement renseignent sur la rigidité du déchet.

### Influence sur les tassements

En terme quantitatif, on retiendra des tassements sous sollicitation dynamique de 5 à 25 % et des coefficients spécifiques (ratio tassement relatif / énergie volumique) compris entre 2 et 6 m<sup>3</sup>/tm.

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, les contraintes étant reprises par l'eau elle-même).

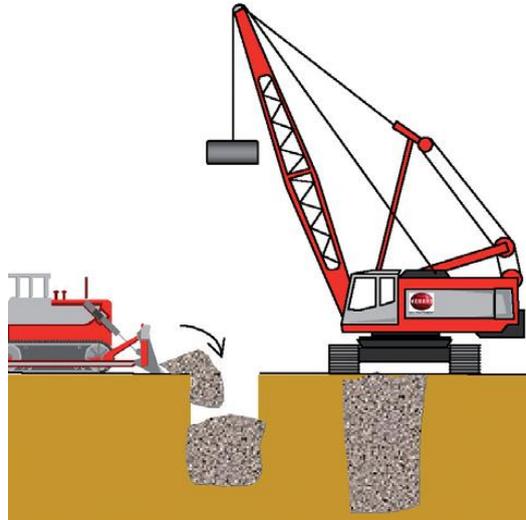


*Schéma mise en œuvre du compactage dynamique (source Menard).*

Le renforcement de sol par Plots Ballastés Pilonnés (appelé également Substitution Dynamique) est une extrapolation du Compactage Dynamique dans laquelle l'énergie de pilonnage sert à constituer par « Substitution Dynamique » des colonnes de matériaux granulaires compactés de gros diamètre qui renforcent les sols compressibles.

Les Plots Ballastés pénètrent dans le sol par pilonnage, à l'aide d'une masse de 10 à 20 tonnes environ, en quasi chute libre de 10 à 30 mètres de hauteur.

Cette technique permet un taux d'incorporation de matériaux nettement supérieur à celui obtenu pour les Colonnes Ballastées (jusqu'à 20 à 25 %).



*Principe du plot ballasté (source Ménard).*



## **Annexe 2**

# **Dimensionnement du renforcement par géogridde**



## I. Vérification à par rapport à la déformation maximale admissible

Dans les paragraphes suivants on retiendra la définition du guide « équivalence » pour la distinction des fonds et des flancs de casiers : « on considère comme flanc toute zone du casier dont la pente minimale excède 14% (8°) ».

### A/ En fond de casier

1. Détermination de la déformation maximale admissible pour la durée de service de l'ouvrage et dans les conditions du site dans les barrières active et passive.
2. Pour une géomembrane en PEHD de 2mm de la barrière active, la littérature retient une valeur de 3 %. (Limit of stress and strain: design criteria for protective layers S. Seeger & W. Muller)
3. Détermination de la raideur résiduelle de la géogrille pour la durée de service de l'ouvrage en zone courante

La distribution des contraintes sur la géogrille est prise uniforme et verticale. Dans l'état des connaissances, nous ne pouvons pas tenir compte des formules de Terzaghi faisant intervenir la cohésion et l'angle de frottement

$$\sigma = \gamma_{Gsup} * (\gamma_{déchet} * n * D + \gamma_{ba} * H_{ba} + \gamma_{bp} * H_{bp} + \gamma_{c, eg} * H_{c, eg} + P) + \gamma_{Qsup} * Q$$

Avec

$\gamma_{déchet}$  : Poids volumique du déchet

$D$  : Diamètre de l'affaissement

$n$  : facteur d'effet voûte ( $n=3$  pour les OM)

$\gamma_{ba}$  : Poids volumique de la barrière active

$H_{ba}$  : épaisseur de la barrière active

$\gamma_{bp}$  : Poids volumique de la barrière passive

$H_{bp}$  : épaisseur de la barrière passive

$\gamma_{bp}$  : Poids volumique de la couche d'égalisation

$H_{bp}$  : épaisseur de la barrière passive au-dessus de la géogrille.

$P$  : Surcharges permanentes

$Q$  : Surcharges temporaires

$\gamma_{Gsup}$  : 1.35

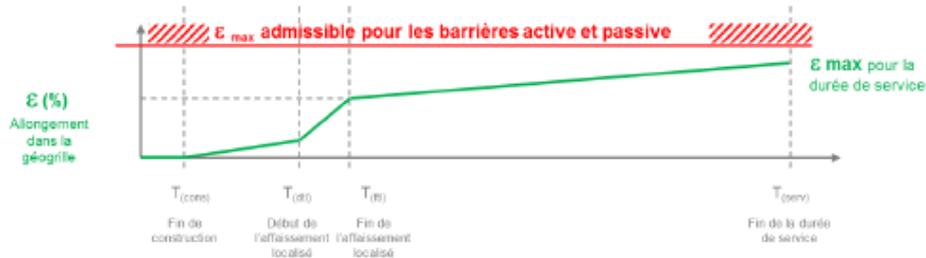
$\gamma_{Qsup}$  : 1.50

La raideur résiduelle de la géogridde pour la durée de service de l'ouvrage et dans les conditions du site doit être supérieure à :

$$J_{\text{Min-zonecourante}} = \frac{\sigma * D}{2 * \epsilon_{\text{max}}} * \sqrt{1 + \frac{1}{6 * \epsilon_{\text{max}}}}$$

Avec

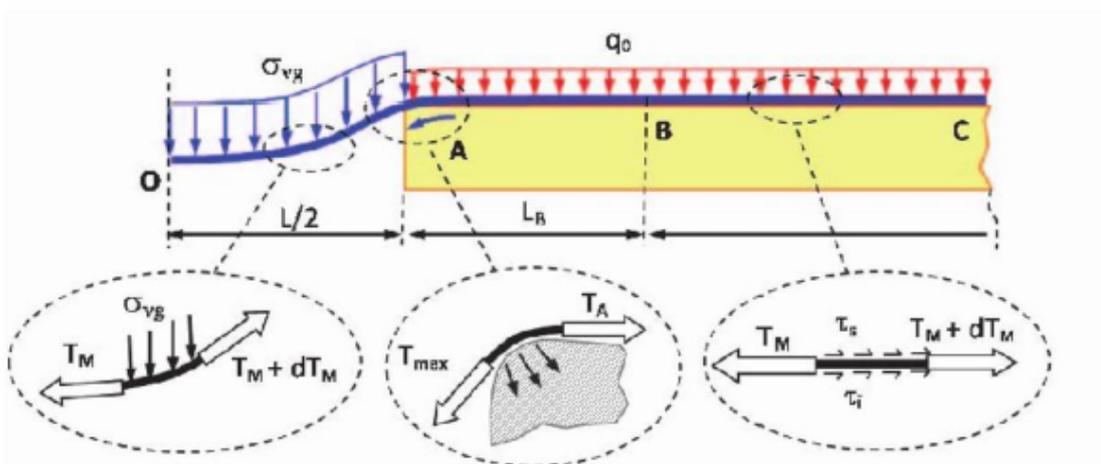
$\epsilon_{\text{max}}$  : Allongement maximum admissible dans la géogridde pour ne pas affecter le bon fonctionnement des barrières de sécurité passive et active.



#### 4. Prise en compte du Déplacement en bord de cavité. (Méthode de Briançon et Villard).

Lors de l'affaissement localisé, il s'effectue un glissement de la géogridde lors de la mobilisation des efforts d'ancrage. L'allongement maximum admissible par les barrières active et passive doit tenir compte de ce phénomène, déclaré par les auteurs comme non négligeable.

Il s'agit d'un calcul itératif à partir de la raideur résiduelle de la géogridde pour la durée de service en zone courante. Il faut donc augmenter la raideur de la géogridde pour compenser son déplacement au niveau des ancrages afin de respecter les critères de déformation maximale pour les barrières active et passive



Le déplacement en bord de cavité s'obtient en résolvant de manière itérative le système de deux équations à deux inconnues ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D}{4\beta} \left( \beta \sqrt{1 + \beta^2} + \text{ArgSh}(\beta) \right) - \frac{D}{2} = U_A + \sigma_{vg} D^2 * \frac{3 + \beta^2}{12\beta J} \\ \\ U_A = \frac{T_A}{Jr} \text{ si } U_A \leq U_0 \\ \\ U_A = U_0 + \frac{(T_A^2 - T_B^2)}{2J\tau_0} \text{ si } U_A > U_0 \end{array} \right.$$

Avec

$$r = \sqrt{\frac{q_0(\tan\delta_i + \tan\delta_s)}{JU_0}}$$

$$T_A = (\sigma_{vg} D \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{2\beta}}) / (e^{\alpha \arctan \beta \tan \delta_i})$$

$$T_B = U_0 Jr$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{U_A}{U_0} \text{ si } U_A \leq U_0 \\ \\ \alpha = 1 \text{ si } U_A > U_0 \end{array} \right.$$

Sur la cavité

$$T_{max} = \frac{\sigma_{vg} D}{2\beta} \sqrt{1 + \left(\frac{2\beta x}{D}\right)^2}$$

$$d_g = \beta \frac{D}{4}$$

$\sigma_{vg}$  : Contrainte verticale au-dessus de l'affaissement

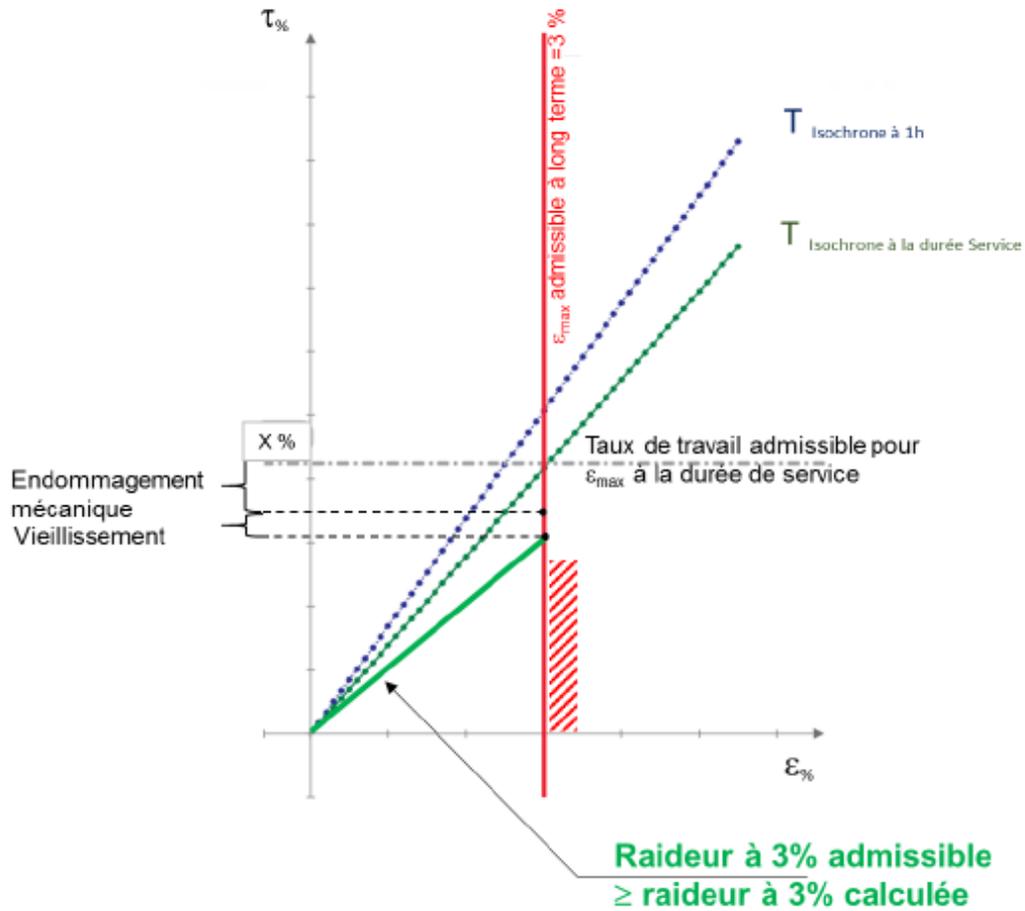
$q_0$  : Contrainte verticale de part et d'autre de l'affaissement

$\delta_i$  (resp.  $\delta_s$ ) : Frottement de la géogridde avec le sol inférieur (resp. sol supérieur)

$J$  : raideur initiale de la géogridde

$J_r$  : raideur minimale requise pour respecter les critères

5. Vérification de la raideur résiduelle de la géogrille pour la durée de service de l'ouvrage vis-à-vis de la raideur minimale requise  
 (Raideur en zone courante, Raideur en tenant compte du déplacement en bord de cavité)



Exemple de relation tension-allongement pour une géogrille

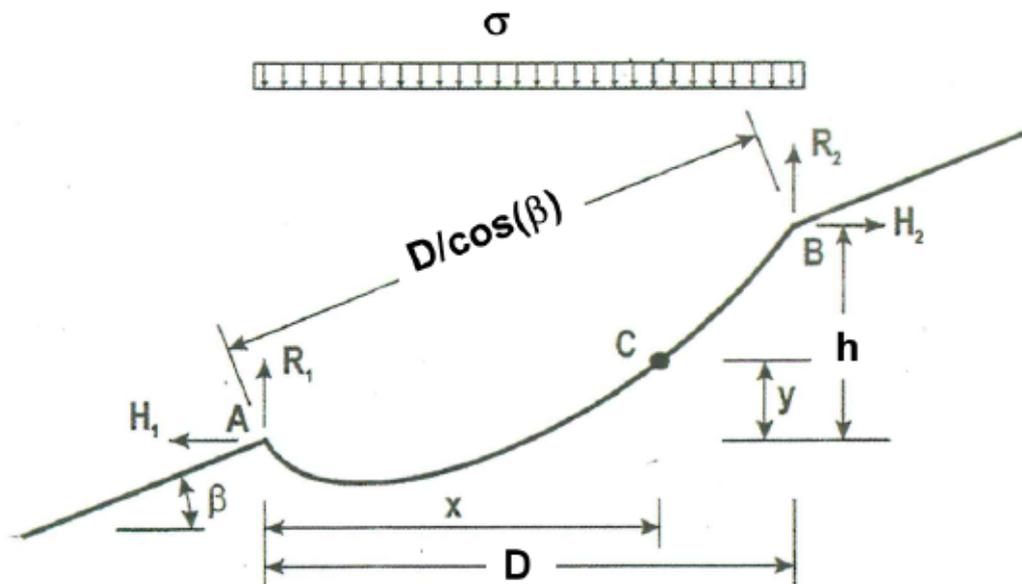
## **B/ Sur les flancs**

Dans le cas d'extension latérale ou d'extension mixte, le renforcement par géogridde peut s'avérer nécessaire sur les flancs. Dans ce cas la géométrie et donc les équations diffèrent. Les équations sur flanc ont été établies par Netlon (1997) et repris par d'autres auteurs dans plusieurs publications scientifiques internationales (en autres, D.R.V. JONES & R.J. PINE, « Design of inclined geosynthetic lining systems for vertical landfill expansion », Sardinia 2001).

### Principe :

Le principe consiste à faire un certain nombre de vérification itérative à partir d'une résistance à la traction à long terme sous 3 % d'allongement et ce pour la géométrie du site.

### Définition de la géométrie



### Définition de la contrainte sur la géogridde

La distribution des contraintes sur la géogridde est prise uniforme et verticale dans les mêmes conditions que pour le fond de casier mais en tenant compte éventuellement des particularités des flancs.

$$\sigma = \gamma_{Gsup} * (\gamma_{déchét} * n * D + \gamma_{ba} * H_{ba} + \gamma_{bp} * H_{bp} + \gamma_{C_{eg}} * H_{C_{eg}} + P) + \gamma_{Qsup} * Q$$

### Détermination de la résistance à la traction aux points A et B

La résistance à la traction est solution réelle et positive de l'équation du second degré :

$$(1 + (\tan \beta)^2) * H^2 + (\sigma * D * \sin \beta) * H + \left( \frac{\sigma^2 * D^2 * \cos \beta^2}{4} - T_d^2 \right) = 0$$

Avec

$T_d$  : la résistance à long terme pressentie/initiale pour l'allongement maximum admissible à long terme de 3 %.

Détermination de l'allongement obtenu dans la géogridde pour la valeur de  $T_d$  à 3 % pressentie.

$$R_1 = \frac{\sigma * D * \cos \beta}{2} - H * \tan \beta$$

$$A = \frac{\sigma}{2 * H}$$

$$B = \frac{R}{H}$$

$$L = \frac{1}{2 * A} \int_{-B}^{2 * A * H - B} \sqrt{(u^2 + 1)} du$$

Avec

$L$  : Longueur de la partie de la géogridde déformée

$$\varepsilon = \frac{L - D}{D}$$

Si la valeur de  $\varepsilon$  obtenue est inférieure à la limite de 3 %, la résistance sélectionnée convient, sinon on réitère le calcul avec une valeur plus importante de  $T_d$  jusqu'à obtenir une valeur inférieure à 3 %

## II. Vérification de la non rupture de la géogrille.

La vérification à l'état limite ultime vis à vis de la rupture en traction de la géogrille fait l'objet d'une démarche particulière qui doit prendre en compte le comportement long terme du produit.

La vérification aux états limites ultimes s'écrit :

$$T_{ELU} \leq T_{Adm}$$

Avec  $T_{Adm}$  la résistance admissible de la géogrille qui peut être évaluée à partir de la résistance ultime à court terme ( $T_{ULT}$ ) mesurée suivant la norme NF EN ISO 10319 :

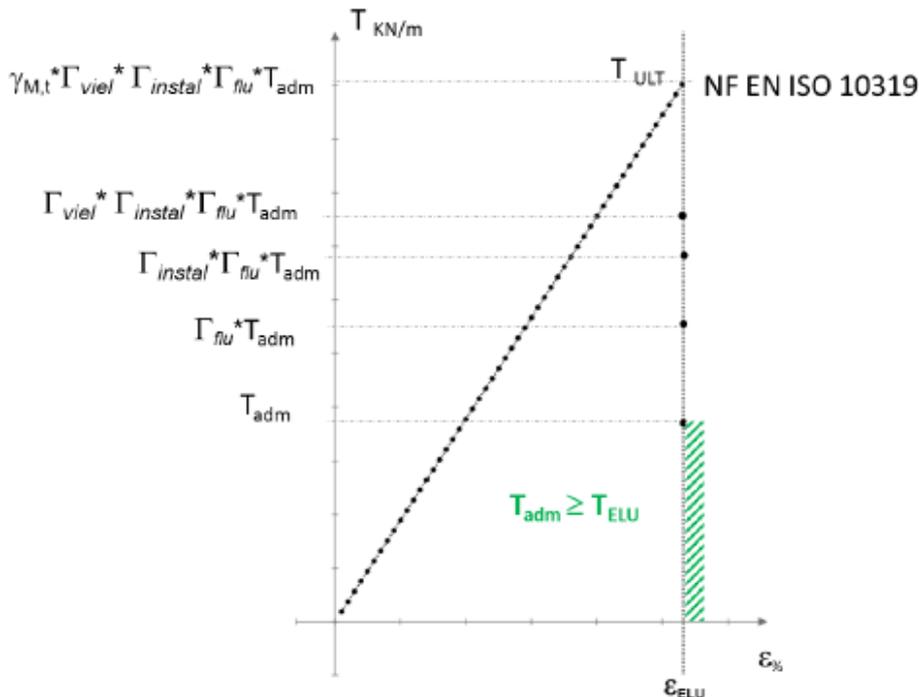
$$T_{Adm} \leq \left( \frac{1}{\Gamma_{géo}} \right) \cdot T_{ULT}$$

avec  $\Gamma_{géo}$  le coefficient qui intègre le facteur partiel de la résistance en traction  $\gamma_{Mt}$  du tableau ci-dessus et les coefficients réducteurs qui permettent de prendre en compte le comportement dans le temps de la géogrille :

$$\Gamma_{géo} = \gamma_{Mt} * \gamma_{flu} * \gamma_{vieil} * \gamma_{instal}$$

avec

- $\gamma_{Mt}$  : le facteur partiel sur la résistance en traction.
- $\gamma_{flu}$  : le coefficient de réduction lié à la réduction de la résistance en traction lors du fluage des géogrilles.
- $\gamma_{vieil}$  : le coefficient de réduction lié à la réduction de la résistance en traction due au vieillissement des géogrilles dépendant des conditions d'environnement.
- $\gamma_{instal}$  : le coefficient de réduction correspondant à la réduction de la résistance en traction due à l'endommagement des géogrilles lors de leur installation et du compactage.





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

**Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)