

Document public

Guide de recommandations pour la conception des couvertures d'Installations de Stockage de Déchets Dangereux, Non Dangereux et Inertes

Rapport final

BRGM/RP-69462-FR

Mars 2020



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Guide de recommandations pour la conception des couvertures d'Installations de Stockage de Déchets Dangereux, Non Dangereux et Inertes

Rapport final

BRGM/RP-69462-FR

Mars 2020

B. Chevrier

Avec la collaboration du Ministère de la Transition Écologique 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 : 25/03/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : F. Garrido

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

Date : 06/04/2020

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

Le présent guide a été élaboré, à la demande du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (Bureau de la Planification et de la gestion des déchets), par un groupe de travail composé de :

Les organismes qui ont participé au Groupe de Travail Équivalence et/ou à la rédaction de ce guide sont :

- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) : Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) 6 Bureau de la Planification et de la Gestion des Déchets (BPGD) ;
- AFITEXINOV ;
- ANTEA GROUP ;
- AMORCE ;
- ARCADIS ;
- BRGM ;
- BURGEAP ;
- CHASSAGNAC CONSEILS ;
- DRIEE ;
- DSC ;
- ECOGEOS ;
- EODD ;
- FNADE ;
- FRANCE MACCAFERRI ;
- FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT ;
- HUESKER ;
- INERIS ;
- INFRAG ;
- IRSTEA ;
- LOW&BONAR ;
- METED_K ;
- NAUE ;
- PAPREC ;
- ROBIN DES BOIS ;
- RAZEL-BEC FAYAT ;
- SAFEGE ;
- SECHE ENVIRONNEMENT ;
- INOVYN ;
- SEMARDEL ;
- SUEZ ;
- VEOLIA.

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

Chevrier B. (2020) - Guide de recommandations pour la conception des couvertures d'Installations de Stockage de Déchets Dangereux, Non Dangereux et Inertes. Rapport final. BRGM/RP-69462-FR, 64 p., 15 fig., 12 tabl.

Sommaire

1. Lexique	7
2. Objectifs et cadre réglementaire	9
2.1. OBJECTIFS DU GUIDE	9
2.2. DIFFÉRENTS TYPES DE COUVERTURE	9
2.3. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE	11
2.3.1. Installations de stockage de déchets inertes	11
2.3.2. Installations de stockage de déchets non dangereux	11
2.3.3. Installations de stockage de déchets dangereux	13
2.4. FONCTIONS PRINCIPALES D'UNE COUVERTURE	15
2.5. PRINCIPALES CONTRAINTES	15
3. Fonction support	17
4. Fonction mise à la pression atmosphérique	19
4.1. MATÉRIAUX GRANULAIRES	19
4.2. GÉOSYNTHÉTIQUES DRAINANTS	19
5. Fonction étanchéité	21
5.1. COUCHE D'ÉTANCHÉITÉ EN MATÉRIAU COMPACTE	21
5.2. ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOSYNTHÉTIQUES	22
5.2.1. Géomembranes	22
5.2.2. Sélection des géomembranes en couverture d'ISD	22
5.2.3. Sollicitation mécanique de la géomembrane	23
5.2.4. Caractéristiques des géosynthétiques bentonitiques	24
5.2.5. Conditions de mise en œuvre dans un dispositif d'étanchéité	24
5.3. DÉFINITION D'UN OBJECTIF D'INFILTRATION AU TRAVERS DE LA COUVERTURE	25
6. Fonction drainage des eaux	27
6.1. ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX	27
6.2. CONDITIONS D'UNE BONNE EFFICACITÉ DU DRAINAGE	27
6.3. DRAINAGE PAR DES MATÉRIAUX GRANULAIRES	27
6.3.1. Nature des granulats	27
6.3.2. Caractéristiques physico-chimiques d'un granulat	28
6.3.3. Critères de sélection d'un matériau granulaire	29
6.4. MATÉRIAUX GÉOSYNTHÉTIQUES ET GÉOCOMPOSITES DRAINANTS	31
6.4.1. Rappel de quelques définitions	31
6.4.2. Caractéristiques générales des produits de drainage géosynthétiques	31

6.5. ÉLÉMENTS DE DIMENSIONNEMENT DE LA COUCHE DRAINANTE.....	32
6.5.1. Transmissivité et capacité de débit dans le plan.....	32
6.5.2. Approche simplifiée.....	33
6.5.3. Estimation du débit d'eau à évacuer.....	33
6.5.4. Dimensionnement d'une couche de drainage en matériaux granulaires.....	35
6.5.5. Dimensionnement d'une couche de drainage en géosynthétique.....	35
7. Fonction filtration.....	37
7.1. ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX.....	37
7.2. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT.....	37
7.2.1. Critères liés au matériau sus-jacent.....	37
7.2.2. Critères liés au géosynthétique.....	38
8. Fonction renforcement mécanique et stabilité du dispositif de couverture.....	39
8.1. STABILITÉ DES INTERFACES ENTRE LES COUCHES.....	39
8.2. RENFORCEMENT MÉCANIQUE DE LA COUVERTURE.....	41
9. Fonction anti-érosion.....	43
9.1. FACTEURS INFLUENÇANT L'ÉROSION.....	43
9.2. PRÉVENTION DE L'ÉROSION.....	44
9.2.1. Choix du modelé.....	44
9.2.2. La végétalisation.....	45
9.2.3. Les matériaux synthétiques.....	45
10. Fonction support du couvert végétal.....	47
10.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES D'UN SOL.....	47
10.1.1. La texture du sol.....	47
10.1.2. La structure et l'aération du sol.....	48
10.2. CARACTÉRISTIQUES BIOGÉOCHIMIQUES.....	49
10.2.1. La matière organique.....	49
10.2.2. Le rapport carbone/azote (C/N).....	49
10.2.3. Les amendements en matière organique.....	49
10.2.4. Le Ph.....	49
10.2.5. Les éléments chimiques.....	50
10.3. LES SOLS RECONSTITUES.....	51
10.4. MISE EN ŒUVRE DE LA COUCHE DE VÉGÉTALISATION.....	51
11. Traitement des points singuliers.....	53
11.1. INTERACTIONS AVEC LE RÉSEAU DE DRAINAGE DU BIOGAZ ET DE POMPAGE DE LIXIVIATS.....	53
11.2. INTERACTIONS AVEC LE RÉSEAU DE DRAINAGE DES EAUX SUPERFICIELLES.....	55

12. Suivi et contrôles	57
12.1.SUIVI DES DÉFORMATIONS DE LA COUVERTURE	57
12.1.1.Tassements	57
12.1.2.Instabilités locales	58
12.2.INTÉGRITÉ DE LA COUCHE D'ÉTANCHÉITÉ	58
12.3.CONTRÔLE DE LA CAPACITÉ DE DRAINAGE DES EAUX MÉTÉORIQUES	59
12.3.1.Couche de drainage	59
12.3.2.Fossés et cunettes	59
12.4.QUALITÉ ET ÉVOLUTION DU COUVERT VÉGÉTAL	59
13. Usages futurs	61
14. Références citées	63

Listes des Figures

Figure 1 : Exemple des trois types de couvertures d'ISD.....	10
Figure 2 : Dispositif réglementaire de base de couverture des casiers d'ISDND.....	12
Figure 3 : Dispositif de couverture alternatif des casiers d'ISDND.....	12
Figure 4 : Dispositif réglementaire de base de couverture des casiers en mode bioréacteur.....	13
Figure 5 : Dispositif réglementaire alternatif de couverture des casiers en mode bioréacteur.....	13
Figure 6 : Dispositif de couverture réglemenaire de base des casiers d'ISDD	14
Figure 7 : Distinction zone sommitale / talus : critère de pente maximale.....	21
Figure 8 : Représentation schématique du fonctionnement hydraulique de la couche drainante (modifié d'après McEnroe, 1994 ; Cancelli et Rimoldi, 1994)	33
Figure 9 : Carte des régions de pluviométrie homogène.....	34
Figure 10 : Stabilité mécanique à vérifier pour chaque interface	39
Figure 11 : Carte de France de l'érosivité des pluies (Pihan, 1986)	44
Figure 12 : Diagramme de texture des sols.....	47
Figure 13 : Exemples de traitement de traversée de couverture par un puits	54
Figure 14 : Exemples de traitement de fossés en crête de talus (en haut : zone courante, en bas : exutoire).....	55
Figure 15 : Exemples de traitement de fossés en pied de talus (en haut : zone courante, en bas : exutoire).....	56

Listes des Tableaux

Tableau 1 : Les différentes couches de la « couverture type » et leurs fonctions respectives (du haut vers le bas)	15
Tableau 2 : Géomembranes applicables en couvertures d'ISD	23
Tableau 3 : Choix du coefficient de réaménagement	25
Tableau 4 : Valeurs indicatives de perméabilité de granulats en fonction de la granularité.....	28
Tableau 5 : Critères de sélection d'un matériau granulaire pour une couche de drainage	30
Tableau 6 : Critères de sélection supplémentaires en vue de l'utilisation de granulat d'origine artificielle d'après la classification SETRA (1992).....	30
Tableau 7 : Géosynthétiques de drainage des eaux météoriques	32
Tableau 8 : Exemples d'angles de frottements d'interface mesurés sous des contraintes de compression comprises entre 5 et 15kPa entre une géomembrane et différents types de géotextiles (source : AFNOR NF G 38-067)	40
Tableau 9 : Principaux éléments chimiques présents dans le sol	50
Tableau 10 : Synthèse des caractéristiques d'un sol pour végétalisation	51
Tableau 11 : Synthèse des méthodes de suivi en grand de l'évolution géométrique du massif de déchets...	58
Tableau 12 : Exemples d'usages potentiels au droit d'ISD après exploitation des casiers.....	61

1. Lexique

AM : Arrêté Ministériel

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

CFG : Comité Français des Géosynthétiques

DEDG : Dispositif d'étanchéité-drainage par géosynthétiques

EPDM : Éthylène-propylène-diène monomère

GCD : Géocomposite de Drainage

GMB : Géomembrane

GNT : Grave Non Traitée

GSB : Géosynthétique bentonitique

GSY : Géosynthétique

GTX : Géotextile

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

ISD : Installation de Stockage de Déchets

ISDD : Installation de Stockage de Déchets Dangereux

ISDND : Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux

ISDI : Installation de Stockage de Déchets Inertes

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

MOF : Matière organique fraîche

PEBD : Polyéthylène Basse Densité

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PP : Polypropylène

PVC : Polychlorure de Vinyl

2. Objectifs et cadre réglementaire

2.1. OBJECTIFS DU GUIDE

La couverture d'une installation de stockage de déchets a une influence importante sur le devenir à moyen et à long terme du site, et sur son impact sur l'environnement. Les fonctions que peuvent remplir les éléments constitutifs d'une couverture sont multiples : drainage des effluents liquides et gazeux, étanchéité, filtration, protection contre l'intrusion, support du couvert végétal, réintégration paysagère, etc. Pour être efficace, la couverture doit être conçue et dimensionnée en prenant en compte un nombre important de facteurs, ainsi que le caractère évolutif du stockage dans son ensemble (évolution de la géométrie, des usages, ...).

Ce guide a pour objectif de fournir des éléments d'aide à la conception et au dimensionnement des couvertures d'installations de stockage de déchets, notamment :

- fournir des éléments d'aide au choix du type de couverture, par rapport à des contraintes réglementaires et des objectifs de performances ;
- définir les fonctions des différents éléments constitutifs des couvertures permettant d'atteindre ces objectifs ;
- fournir des recommandations pour le choix de ces éléments constitutifs, leur dimensionnement, les méthodes de mise en œuvre, le contrôle qualité, l'instrumentation, la prévention, et le suivi.

Il n'existe pas de solution unique en matière de couverture d'installation de stockage de déchets, c'est pourquoi ce guide ne se veut **ni directif ni restrictif**. Il propose une démarche cohérente qui s'appuie sur des objectifs de performances, dans le respect des prescriptions réglementaires.

2.2. DIFFÉRENTS TYPES DE COUVERTURE

Les types de couvertures sont définis en fonction de différents objectifs généraux de performances qui peuvent s'avérer nécessaires en fonction du contexte de l'installation de stockage de déchets (ISD). Les objectifs principaux de performances sont notamment :

- isoler physiquement le massif de déchets des milieux extérieurs ;
- maîtriser les flux liquides et gazeux (collecte et traitement) ;
- favoriser la stabilisation biologique des déchets le cas échéant ;
- favoriser la végétalisation du site et sa réintégration paysagère.

Ces objectifs de performance (spécifiques à chaque type d'ISD) sont susceptibles d'évoluer dans le temps, en fonction de l'évolution constatée du massif de déchets ou des contraintes environnementales et réglementaires du site.

Plusieurs de ces objectifs de performances sont directement liés à une infiltration potentielle au sein du massif de déchets. Sur la base de ces objectifs, on distinguera trois principaux types de couvertures, illustrés de manière schématique dans la Figure 1 ainsi qu'une grille de sélection en fonction des objectifs de performances est proposée dans le Tableau 1 :

- la couverture semi-perméable (Figure 1A) ;
- la couverture imperméable (Figure 1B) ;
- la couverture imperméable avec réinjection des lixiviats (couverture de type 3 ; Figure 1C).

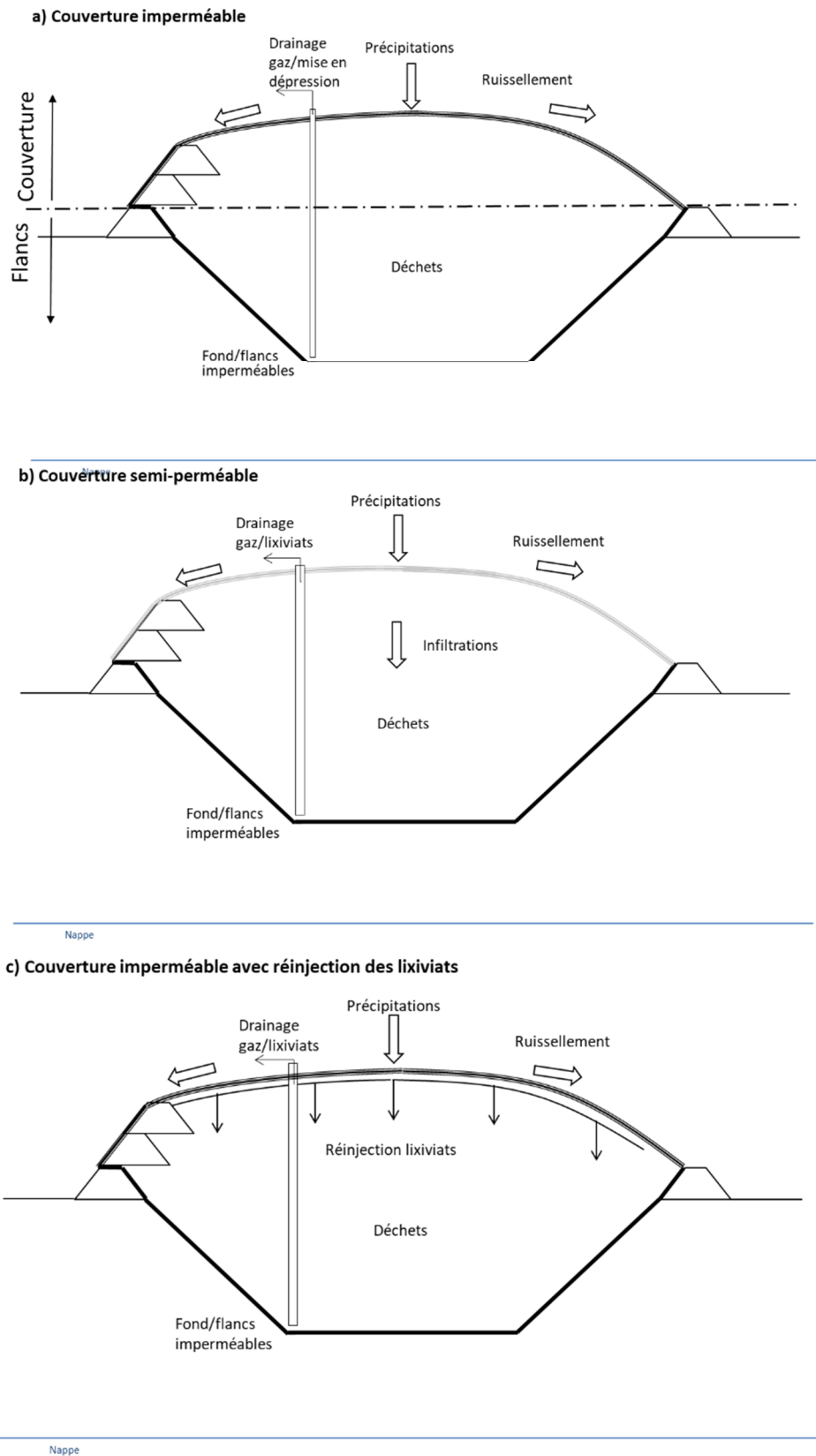


Figure 1 : Exemple des trois types de couvertures d'ISD.

2.3. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

2.3.1. Installations de stockage de déchets inertes

L'aménagement et l'exploitation des Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) sont encadrés par l'Arrêté Ministériel du 12 décembre 2014 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations du régime de l'enregistrement relevant de la rubrique n° 2760 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

La couverture du massif de déchets de ces installations est abordée à l'article 33 de cet arrêté.

Article 33 de l'arrêté du 12 décembre 2014

« Une couverture finale est mise en place à la fin de l'exploitation de chacune des tranches issues du phasage proposé par l'exploitant et repris dans l'autorisation préfectorale d'exploiter. Son modelé permet la résorption et l'évacuation des eaux pluviales compatibles avec les obligations édictées aux articles 640 et 641 du code civil. La géométrie en plan, l'épaisseur et la nature de chaque couverture sont précisées dans le plan d'exploitation du site. Les aménagements sont effectués en fonction de l'usage ultérieur prévu du site, notamment ceux mentionnés dans les documents d'urbanisme opposables aux tiers. Dans tous les cas, l'aménagement du site après exploitation prend en compte l'aspect paysager. L'aménagement ne peut pas comporter de création de plan d'eau qui entraîne la mise en contact des déchets stockés avec de l'eau ».

On peut remarquer dans cet article les points suivants :

1. La structure de la couverture finale n'est pas imposée, mais ;
2. Elle doit atteindre un certain niveau de performances en termes de résorption et de ruissellement des eaux météoriques. La conformité aux articles 640 et 641 du code civil impose que le débit des eaux de ruissellement atteignant les parcelles à l'aval de l'ISDI ne peut être augmenté par la présence de celle-ci.

2.3.2. Installations de stockage de déchets non dangereux

L'aménagement et l'exploitation des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) font l'objet de l'Arrêté Ministériel du 15 février 2016. La couverture du massif de déchets est abordée aux articles 34, 35, 44 et 55 de cet arrêté.

Article 34 de l'arrêté du 15 février 2016

« Tout casier est muni dès la fin de sa période d'exploitation d'une couverture intermédiaire dont l'objectif est la limitation des infiltrations d'eaux pluviales et la limitation des émissions gazeuses. Cette couverture est constituée d'une couverture minérale d'épaisseur de 0,5 mètre constituée de matériaux inertes d'une perméabilité inférieure à 1.10^{-7} m/s. La couverture intermédiaire est mise sur tout casier n avant la mise en exploitation du casier n+2 ».

Cet article s'applique aux casiers exploités en mode conventionnel (sans recirculation). La structure de la couverture intermédiaire y est imposée sans recours possible, *a priori*, à un dispositif présentant des performances équivalentes.

Article 35 de l'arrêté du 15 février 2016

« Au plus tard deux ans après la fin d'exploitation, tout casier est recouvert d'une couverture finale...

... La couverture finale est composée, du bas vers le haut de :

- *Une couche d'étanchéité ;*
- *Une couche de drainage des eaux de ruissellement composée de matériaux naturels d'une épaisseur minimale de 0,5 mètre ou de géosynthétiques ;*
- *Une couche de terre de revêtement d'une épaisseur minimale d'un mètre.*

... Si la couche d'étanchéité est une géomembrane, l'exploitant justifie de la mise en œuvre de bonnes pratiques en termes de pose pour assurer son efficacité...

... Les dispositions de cet article peuvent être adaptées par le préfet sur demande de l'exploitant, sous réserve que les dispositions constructives prévues garantissent une efficacité équivalente à celle qui résulte de la mise en œuvre des prescriptions de cet article. En tout état de cause, la somme de l'épaisseur de la couche de drainage des eaux de ruissellement et de celle de la couche de terre de revêtement est supérieure à 0,8 mètre... ».

Cet article s'applique à tous les types de casiers, sans distinction de mode d'exploitation, et concerne la couverture finale du massif de déchets. On peut remarquer les points suivants :

1. La structure et les performances de la couche d'étanchéité ne sont pas spécifiées. Il peut s'agir soit de la couche minérale mentionnée aux articles 34 et 55 soit d'une géomembrane ;
2. Seules l'épaisseur et la nature des matériaux de la couche de drainage des eaux météoriques sont spécifiées. La perméabilité de cette couche n'est pas imposée ;
3. La couche de drainage des eaux météoriques peut être constituée de nappes de géosynthétiques ;
4. La couche de drainage et la couche de végétalisation peuvent être remplacées, de manière combinée, par un dispositif présentant une efficacité équivalente au dispositif réglementaire de base et dont l'épaisseur minimale est de 0,8 m (au lieu de 1,5 m). Les termes de cette efficacité (drainage, stabilité, érosion, végétalisation, ...) ne sont pas précisés.

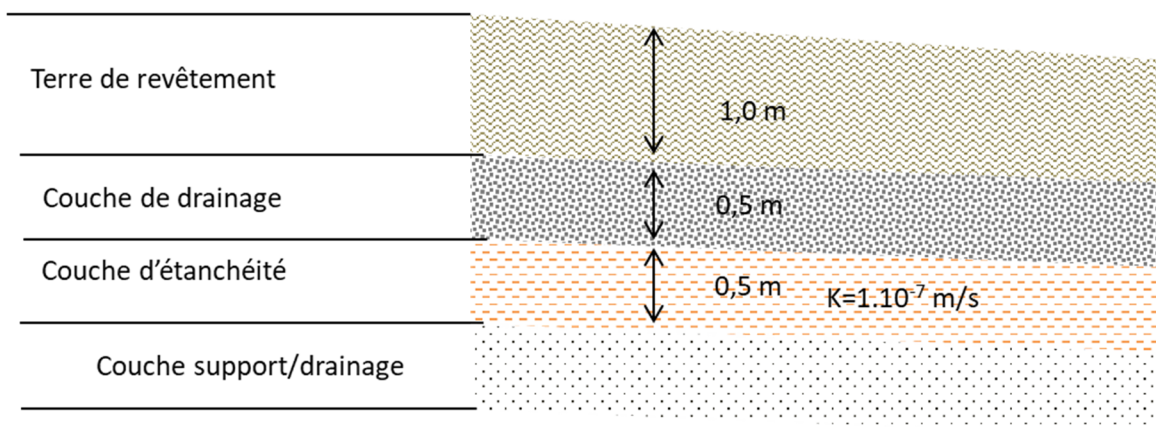


Figure 2 : Dispositif réglementaire de base de couverture des casiers d'ISDND.

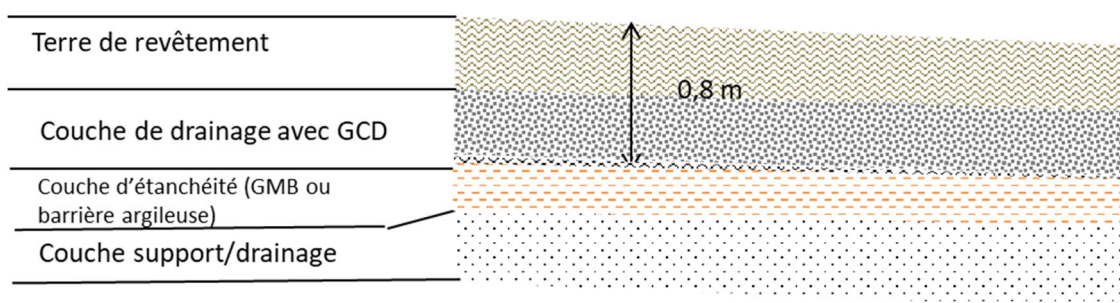


Figure 3 : Dispositif de couverture alternatif des casiers d'ISDND.

Article 44 de l'arrêté du 15 février 2016

« Pour les casiers mono-déchets dédiés au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante, la couverture finale comprendra une couche anti-érosion composée d'éléments minéraux grossiers, d'une épaisseur minimale d'un mètre ».

Cet article ne précise pas si cette couche anti-érosion se substitue à tout ou partie du dispositif mentionné à l'article 35, ou vient en complément de ce dispositif.

L'objectif de cette couche anti-érosion est d'éviter la dispersion de fibres d'amiante dans l'air ambiant, en garantissant le maintien d'une épaisseur minimale de matériaux à long terme.

Article 55 de l'arrêté du 15 février 2016

« *Tout casier exploité en mode bioréacteur est équipé d'une couverture d'une épaisseur minimale de 0,5 mètre et d'une perméabilité inférieure à 5.10^{-9} m/s au plus tard six mois après la fin d'exploitation de la zone exploitée en mode bioréacteur* ».

Cet article s'applique aux casiers exploités en mode bioréacteur. La structure de cette couverture intermédiaire peut faire l'objet d'un dispositif équivalent. Sa mise en place est un prérequis à la mise en service du dispositif de réinjection. La structure de couverture finale doit répondre aux spécifications de l'article 35 de l'AM du 15 février 2016.

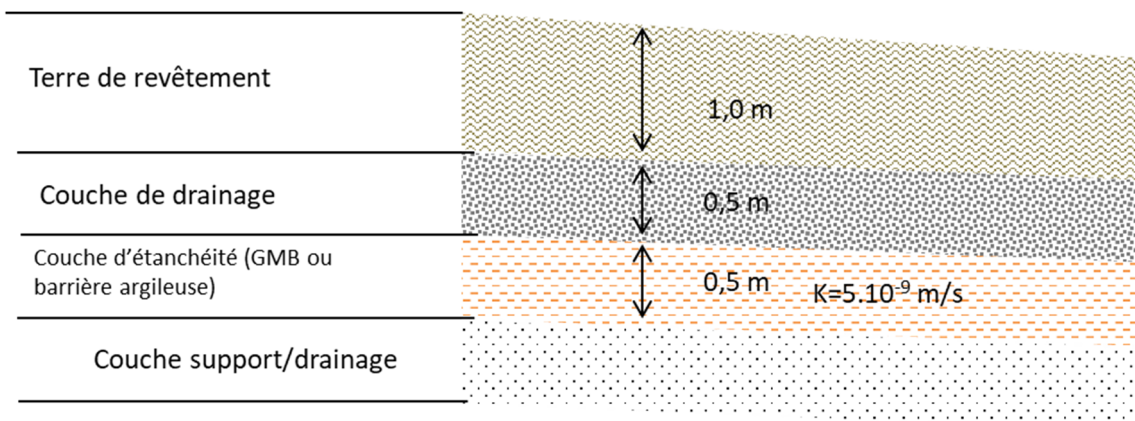


Figure 4 : Dispositif réglementaire de base de couverture des casiers en mode bioréacteur.

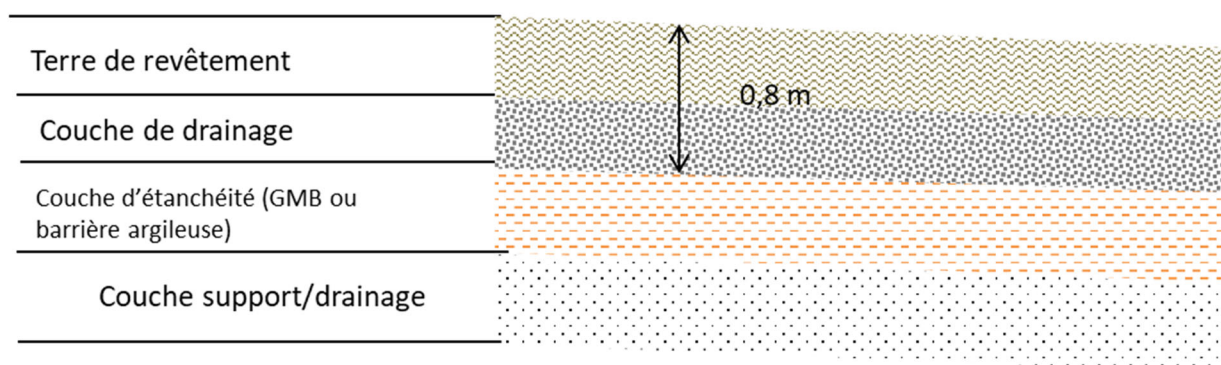


Figure 5 : Dispositif réglementaire alternatif de couverture des casiers en mode bioréacteur.

2.3.3. Installations de stockage de déchets dangereux

L'aménagement et l'exploitation des Installations de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD) font l'objet de l'Arrêté Ministériel du 30 décembre 2002. La couverture du massif de déchets est abordée à l'article 25 de cet arrêté.

Article 25 de l'arrêté du 30 décembre 2002

« *Lorsque la cote maximale autorisée pour le dépôt de déchets est atteinte et cela quel que soit le nombre d'alvéoles superposées, une couverture finale est mise en place pour empêcher l'infiltration d'eau de pluie ou de ruissellement vers l'intérieur de l'installation de stockage. La couverture finale est mise en place¹ au plus tard 8 mois après avoir atteint la cote maximale. Dans l'attente de sa mise en place, une couverture provisoire est installée.*

La couverture finale présente une pente d'au moins 5 % et doit être conçue de manière à prévenir les risques d'érosion et à favoriser l'évacuation de toutes les eaux de ruissellement vers le fossé extérieur de collecte signalé à l'article 18.

¹ A savoir achevée

La couverture a une structure multicouche et comprend au minimum (du haut vers le bas) :

- Une couche d'au moins 30 centimètres d'épaisseur de terre arable végétalisée, permettant le développement d'une végétation favorisant une évapo-transpiration maximale ;
- Un niveau drainant d'une épaisseur minimale de 0,5 m et d'un coefficient de perméabilité supérieur à 1.10^{-4} mètre par seconde dans lequel sont incorporés des drains collecteurs pour les casiers dont la cote maximale est atteinte après la parution au Journal Officiel du présent arrêté. Pour les casiers dont la cote maximale est atteinte avant cette date, il n'est pas imposé d'épaisseur minimale. Ces prescriptions pourront être adaptées en fonction de la spécificité du site ;
- Un écran imperméable composé d'une géomembrane et d'une couche de matériaux d'au moins 1 mètre d'épaisseur, caractérisé par un coefficient de perméabilité au maximum de 1.10^{-9} mètre par seconde ;
- Une couche drainante permettant la mise en dépression du stockage.

La couverture végétale est régulièrement entretenue ».

Cet article impose la mise en place d'une couverture provisoire, mais ne précise pas la structure ou les performances que doit atteindre cette couverture.

Pour ce qui concerne la couverture finale, l'article 25 de l'AM du 30 décembre 2002 impose une structure minimale de couverture et fixe, pour chacune des couches unitaires de cette structure, des caractéristiques techniques minimales (épaisseur, perméabilité, ...).

On note enfin l'obligation réglementaire de mettre en place, à la surface du massif de déchets, une couche de drainage permettant « la mise en dépression du stockage ». Les caractéristiques de cette couche ne sont pas précisées. Cette couche a pour fonction d'assurer la mise à la pression atmosphérique du massif de déchets.

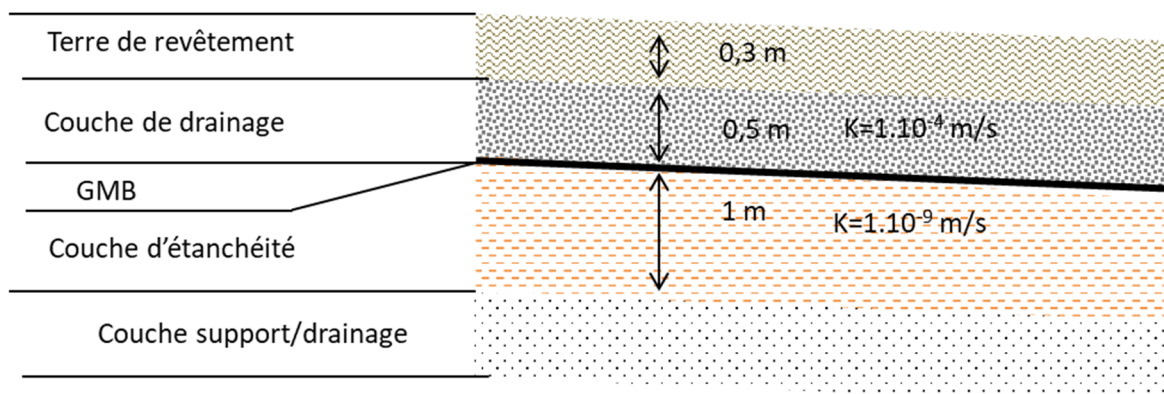


Figure 6 : Dispositif de couverture réglementaire de base des casiers d'ISDD.

2.4. FONCTIONS PRINCIPALES D'UNE COUVERTURE

Une couverture est composée d'une succession de couches unitaires qui se distinguent par leurs fonctions respectives. Les principales fonctions sont présentées dans le Tableau 1 ci-après.

Type d'ISD concerné	Couche	Principales Fonctions
ISDD, ISDND, ISDI	Couvert végétal	<ul style="list-style-type: none"> · Limiter l'érosion · Promouvoir l'évapotranspiration et limiter ainsi l'infiltration d'eau dans les déchets · Favoriser la réintégration paysagère du site
ISDD, ISDND, ISDI	Couche végétalisable	<ul style="list-style-type: none"> · Servir de support et de réserve hydrique à la végétation · Servir de support aux équipements (collecte du gaz ou des lixiviats) · Oxyder le méthane du biogaz · Atténuer les fluctuations de température et d'humidité dans les couches sous-jacentes
ISDD, ISDND	Couche de drainage des eaux	<ul style="list-style-type: none"> · Permettre d'évacuer l'eau météorique latéralement · Réduire la charge hydraulique agissant sur la couche inférieure · Réduire les teneurs en eau des couches supérieures et améliorer leur stabilité · Atténuer les fluctuations de la teneur en eau de la couche inférieure (éviter les fentes de retrait)
ISDD, ISDND	Couche d'étanchéité	<ul style="list-style-type: none"> · Favoriser l'évacuation latérale de l'eau par la couche de drainage et limiter ainsi l'infiltration verticale dans les déchets · Limiter les pertes de biogaz à travers la couverture · Limiter les entrées d'air dans les déchets
ISDD	Couche de mise à la pression atmosphérique	<ul style="list-style-type: none"> · Permettre la mise à la pression atmosphérique du massif
ISDND	Couche support et de drainage des gaz	<ul style="list-style-type: none"> · Servir de couche support pour les couches supérieures · Drainer les biogaz
ISDD, ISDND	Couche de fermeture (facultative, peut être confondue avec la couche support)	<ul style="list-style-type: none"> · Égaliser la surface du massif de déchets · Isoler les déchets des couches fonctionnelles

Tableau 1 : Les différentes couches de la « couverture type » et leurs fonctions respectives (du haut vers le bas).

2.5. PRINCIPALES CONTRAINTES

Les moyens à mettre en œuvre pour satisfaire les fonctions citées au ch 2.4 varient selon un certain nombre de contraintes propres à l'ISD, notamment :

- **la nature des déchets et le mode d'exploitation ;**
 - selon le critère de dangerosité des déchets stockés ainsi que le mode d'exploitation des casiers (bioréacteur), la réglementation impose différents degrés d'étanchéité des couvertures ;
- **la géométrie de la couverture ;**
 - et notamment sa pente. Les fortes pentes nécessiteront des matériaux peu déformables et susceptible de contribuer à la stabilité de la structure multicouche, ce qui influence notamment le choix du type de géosynthétiques. Par ailleurs, la pente a une influence importante sur la fonction drainage ;

- **la configuration du site ;**
 - différentes configurations de sites (en comblement, en tumulus, flanc de talus, etc.) nécessiteront des conceptions de couvertures adaptées, notamment au niveau des ancrages et raccords des géosynthétiques. La configuration du site détermine par ailleurs les conditions de collecte des lixiviats, des gaz et des eaux de ruissellement ;
- **la disponibilité des matériaux ;**
 - Les ressources locales ne permettent pas toujours l'utilisation de matériaux naturels dans des conditions technico-économiques satisfaisantes. Des solutions alternatives à l'utilisation de tels matériaux peuvent alors être préférées ;
- **les conditions climatiques ;**
 - elles ont une influence prépondérante sur le fonctionnement des couvertures (importance de l'infiltration et de l'évapotranspiration), mais également sur leur durabilité (importance de l'érosion).
- **le devenir du site ;**
 - les objectifs de réutilisation ultérieure du site ont une influence directe sur la conception de la couverture. Ils doivent être pris en compte lors de son dimensionnement.

3. Fonction support

La mise en œuvre d'une couverture nécessite une couche support, mise en place directement sur le massif de déchets. Elle doit assurer aux autres composantes de la couverture une assise stable, homogène et nivelée. Elle doit permettre la circulation des engins et la répartition des contraintes nées de l'éventuel tassement différentiel des déchets.

La couche de forme doit présenter la portance et l'état de surface nécessaire à la mise en œuvre de la couche d'étanchéité. 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. Usuellement, une épaisseur de 0,30 m peut être appliquée pour absorber les irrégularités de la surface du massif de déchets. Le cas échéant, la couche de drainage des biogaz du massif de déchets peut être intégrée à la couche de forme.

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 GNT 0/X sont adaptés à cette fonction. La fraction granulométrique supérieure X sera déterminée selon la norme NF P 11-300.

Des éléments de dimensionnement et de mise en œuvre figurent dans le guide « Réalisation des remblais et des couches de forme » (SETRA-LCPC, 1992).

L'usage de matériaux non naturels, issus de l'industrie, peut être envisagé pour la couche de forme. On renverra alors le lecteur vers le guide méthodologique « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Évaluation environnementale » (SETRA, 2011).

Quelques exemples de matériaux alternatifs :

- 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 Grave Non Traitée (GNT) ;
- sols de classe F du GTR 92.

4. Fonction mise à la pression atmosphérique

Cette couche a pour fonction de dissiper toute surpression éventuelle au sein du massif de déchets et maintenir l'intégrité de la couverture. Elle n'est pas nécessairement continue, mais peut être constituée d'un réseau de bandes ou de tranchées connectées à des événements.

4.1. MATÉRIAUX GRANULAIRES

Les matériaux granulaires adaptés à cette fonction sont choisis parmi les matériaux de classe B et D selon le GTR.

4.2. GÉOSYNTHÉTIQUES DRAINANTS

Pour cette fonction, la couche granulaire peut être remplacée par un géosynthétique de caractéristiques équivalentes. Il faudra s'assurer de la capacité de ces matériaux à drainer les gaz sur le long terme et vérifier la transmissivité au gaz après saturation en eau, car certains produits peuvent retenir une quantité importante d'eau par capillarité, ce qui diminue leur section utile pour le passage du gaz.

5. Fonction étanchéité

La fonction étanchéité d'une couverture peut être assurée par la mise en œuvre d'une couche dite de « faible perméabilité » réalisée à l'aide de matériaux naturels ou manufacturés, d'une géomembrane ou d'une combinaison de ces matériaux.

Les matériaux utilisés pour la réalisation de cette couche d'étanchéité peuvent être :

- soit des matériaux naturels, avec ou sans amendement (bentonite, kaolinite, polymères, etc.) ;
- soit des produits manufacturés : géosynthétiques, géomembrane.

Recommandation : la couverture des casiers recevant des déchets biodégradables et qui ne sont pas exploités en mode bioréacteur doit permettre l'infiltration d'un flux d'eaux météoriques entretenant la dégradation des déchets.

5.1. COUCHE D'ÉTANCHÉITÉ EN MATÉRIAU COMPACTÉ

Pour atteindre une faible perméabilité, on peut envisager une gamme assez large de matériaux naturels : limons, silts, sables, argiles, craies, schistes altérés. Le matériau et sa mise en œuvre devront répondre à deux principaux objectifs, l'un lié à la stabilité mécanique de l'ouvrage et l'autre à l'obtention d'un coefficient de perméabilité faible.

Les matériaux naturels sont adaptés à la réalisation de couches d'étanchéité en zone sommitale ou sur talus à faible pente. Pour les talus dont la pente excède 14 % (8°), on pourra s'orienter vers des dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques.

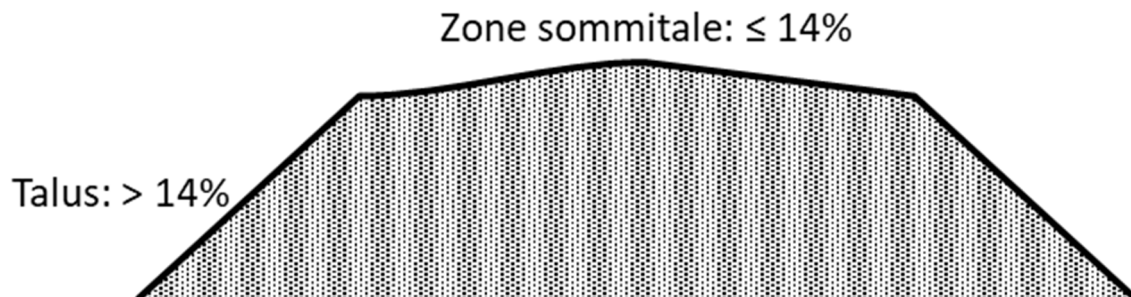


Figure 7 : Distinction zone sommitale / talus : critère de pente maximale.

Le Fascicule de Documentation AFNOR FD P11-302 « Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté », édité en 2017, est spécifiquement dédié à la conception et la réalisation des barrières peu perméables en matériaux naturels. Les recommandations de ce guide, vers lequel on renverra le lecteur, s'appliquent à la réalisation de la couche d'étanchéité d'une couverture d'ISD.

On rappellera de plus que la mise en œuvre des matériaux naturels compactés sur des pentes importantes, outre les difficultés techniques, présente des risques d'insécurité (chutes d'engins, de blocs, ...). La zone de travail et ses abords devront être signalisés et sécurisés conformément aux règles de sécurité du travail.

On peut également envisager, pour la réalisation de la couche d'étanchéité en matériaux compactés, l'utilisation de matériaux alternatifs dès lors qu'ils présentent le potentiel d'étanchéité requis (catégorie F de la norme NF P11-300) et que leur comportement à long terme est compatible.

La méthodologie de réalisation de la barrière compactée doit être établie dans le cadre d'une planche d'essai, réalisée dans les conditions réelles du chantier, et validée par des contrôles (perméabilité, densité, portance, ...). Plus particulièrement, cette planche d'essai doit être réalisée sur le massif de déchets à couvrir et non sur le terrain naturel du site, les caractéristiques mécaniques du support ayant une influence sur le compactage des matériaux fins.

5.2. ÉTANCHÉITÉ PAR GÉOSYNTHÉTIQUES

Selon la terminologie du fascicule n° 11 du CFG, un dispositif d'étanchéité par géosynthétiques est d'une façon générale constitué par (de haut en bas) :

- une structure de protection ;
- une structure d'étanchéité ;
- une structure support.

Les structures de protection et les structures support peuvent être constituées, en fonction du projet, par des sols et /ou des géosynthétiques. La structure d'étanchéité est simple, double ou composite. Cette structure d'étanchéité peut être composée de deux grandes familles de produits manufacturés :

- les géomembranes ;
- les géosynthétiques bentonitiques.

5.2.1. Géomembranes

Les géomembranes sont des matériaux manufacturés, en forme de nappe, à base de polymères. Ce sont des produits adaptés au génie civil, minces, souples, continus et étanches aux liquides même sous des sollicitations de services (AFNOR NF P 84-500). Selon la norme NF EN ISO 10318, une géomembrane est une « *structure assemblée en usine, constituée de géosynthétiques, se présentant sous la forme d'une feuille et dans laquelle la fonction d'écran est essentiellement assurée par des polymères* ».

Les géomembranes peuvent être constituées à partir de thermoplastiques ou d'élastomères. Ces polymères peuvent être renforcés à l'aide d'une armature. La surface de la géomembrane peut être lisse ou rugueuse. Les géomembranes peuvent être également constituées de bitume ; on les appelle alors des géomembranes bitumineuses.

Selon la définition de l'ASQUAL, les géomembranes certifiées en France doivent présenter une épaisseur minimale de 1 mm et une largeur minimale des lés de 1,50 m.

5.2.2. Sélection des géomembranes en couverture d'ISD

Selon le Fascicule n° 11 du CFG, en couverture, les contraintes mécaniques (stabilité, tassements) peuvent s'avérer plus déterminantes pour le choix de la géomembrane que les contraintes de compatibilité chimique.

Type géomembrane	Bitumineuse	EPDM	PEHD	PEBD	PP-F	PVC-P
Spécificités	Géomembrane armée-massive- épaisseur importante	Flexible et élastique- préfabrication possible	Résistance chimique élevée- rouleaux larges	Résistance chimique élevée- rouleaux larges Flexible	Bon compromis entre flexibilité et résistance chimique- rouleaux larges	Flexible - préfabrication possible
Assemblage	Soudure au chalumeau	Vulcanisation à froid	Soudure par thermofusion ou extrusion	Soudure par thermofusion ou extrusion	Soudure par thermofusion ou extrusion	Soudure par thermofusion
Épaisseur minimale recommandée	3,5 mm	Faible retour d'expérience	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	Faible retour d'expérience
Remarques	Étanchéité non contrôlable Évolution chimique potentielle	Étanchéité non contrôlable Coefficient de frottement élevé	Solution courante	Moindre retour d'expérience que le PEHD	Peu de retour d'expérience	Coefficient de frottement élevé

Tableau 2 : Géomembranes applicables en couvertures d'ISD.

5.2.3. Sollicitation mécanique de la géomembrane

La géomembrane ne doit pas être considérée comme un élément intervenant dans la stabilité mécanique de la couverture au sein de laquelle elle est mise en œuvre. En effet, les efforts mécaniques contribuent à l'accélération du vieillissement des géomembranes. La norme AFNOR NF G38-067² précise notamment que « *la structure de recouvrement ne doit pas engendrer d'effort de traction dans l'étanchéité* ».

Le cas échéant, la conception de la couverture devra prévoir une couche de renforcement (voir Ch.8) dont le dimensionnement « *doit être réalisé en sorte que les géomembranes et les géosynthétiques bentonitiques ne soient pas sollicités en traction par l'effet des couches supérieures* ».

En tout état de cause, les couches de recouvrement de la géomembrane induisent obligatoirement un effort de traction dans celle-ci. Le dimensionnement de la structure de couverture, y compris l'éventuelle couche de renforcement, devra être réalisé en tenant compte des caractéristiques de la géomembrane retenue.

² NF G38-067 Mai 2017 -Géosynthétiques, géotextiles et produits apparentés - Stabilisation d'une couche mince sur pente - Justification du dimensionnement et éléments de conception

5.2.4. Caractéristiques des géosynthétiques bentonitiques

Définition du géosynthétique bentonitique

Le géosynthétique bentonitique est un matériau manufacturé composite. Il est constitué d'une couche de bentonite insérée soit entre deux géotextiles, soit entre un géofilm et éventuellement un géotextile (fascicule n°12 du CFG). Les géosynthétiques bentonitiques assurent la fonction « étanchéité » uniquement après une phase d'hydratation sous confinement (0,80 m minimum selon le Fascicule n° 13 du CFG).

Caractéristiques des différents éléments du géosynthétique bentonitique

La **bentonite** est le nom industriel donné aux argiles constituées essentiellement de montmorillonite, minéral formé de feuillets de silicates et d'alumine. Selon les recommandations du guide « équivalence »³, la bentonite constitutive des GSB doit présenter les caractéristiques suivantes :

- CaCO₃ : ≤ 5 % ;
- CEC : > 70 meq/100 g ;
- Indice de gonflement : ≥ 24 ml/2 g.

Les **géotextiles** sont des matériaux perméables à l'eau et à l'air constitués d'un ensemble de fibres synthétiques, employés dans le domaine du génie civil et de la géotechnique, en contact avec des sols ou d'autres matériaux de construction (voir Fascicules du CFG).

5.2.5. Conditions de mise en œuvre dans un dispositif d'étanchéité

Pour ce qui concerne la sélection des matériaux, la conception des ouvrages, la préparation des travaux et la mise en œuvre des géosynthétiques, on renverra le lecteur vers :

- CFG, Fascicule n° 10 : recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes ;
- CFG, Fascicule n° 11 : recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets ;
- CFG, Fascicule n° 12 : recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques ;
- CFG, Fascicule n° 13 : recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en Installations de Stockage de Déchets.

Ces Fascicules sont disponibles sur www.cfg.asso.fr.

³ Guide de recommandations pour la conception et l'évaluation de dispositifs « d'équivalence » en étanchéité passive d'installations de stockage de déchets (BRGM, 2019).

5.3. DÉFINITION D'UN OBJECTIF D'INFILTRATION AU TRAVERS DE LA COUVERTURE

Dans le cas des couvertures perméables et semi-perméables, l'apport d'eau au sein du massif de déchets est contrôlé principalement par les précipitations météoriques.

Pour estimer les volumes infiltrés annuellement à travers une couverture, on pourra appliquer la formule suivante⁴ :

$$L = P \times 10^{-3} \times S \times 0,4 \times Cr$$

Avec

L= volume annuel infiltré à travers la couverture (m³)

P= pluviométrie annuelle (mm)

S= surface de la couverture (m²)

Cr= coefficient de réaménagement, assimilable à un coefficient d'infiltration

Les valeurs obtenues avec cette formule sont cohérentes avec les retours d'observation des exploitants d'ISD en France. Concrètement, le Tableau 3 résume des valeurs de Cr indicatives en fonction du type d'ISD et du type de couverture.

Type d'ISD	Type de couverture	Cr
ISDI	Finale	0,7
ISDND	Intermédiaire	0,7
	Intermédiaire bioréacteur	0,5
	Finale	0,25
	Finale bioréacteur (avec géomembrane)	0,05
	Finale amiante	0,7
ISDD	Finale (avec géomembrane)	0,05

Tableau 3 : Choix du coefficient de réaménagement.

⁴ T. Gisbert, C. Bloquet, G. Barina and C. Petitpas: Assessing the quantity of leachate: a simple tool for short and long term prediction and its evaluation on real size landfill sites. Sardinia 2003, 9th International Landfill Symposium, Santa Margherita di Pula, Cagliari, Italy

6. Fonction drainage des eaux

6.1. ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX

Dans le fonctionnement de la couverture, le drainage des eaux constitue un **élément essentiel** dans la régulation des échanges. Le drainage joue un rôle vis-à-vis des couches supérieures en contribuant à une régulation de leur teneur en eau, mais aussi de la couche d'étanchéité (qu'elle soit constituée de matériaux naturels ou manufacturés) en limitant les sollicitations hydrauliques.

Les principales fonctions de la couche de drainage visent :

- par rapport aux couches sus-jacentes :
 - à réduire les pressions interstitielles ce qui contribuera à la stabilité d'ensemble de la structure,
 - à contrôler les écoulements et la teneur en eau dans ces couches ;
- par rapport à la couche d'étanchéité (imperméable ou semi-perméable) :
 - à limiter la charge hydraulique sur la couche d'étanchéité, en favorisant l'écoulement latéral des eaux météoriques (au détriment de l'infiltration verticale),
 - à réduire de manière corollaire le débit d'infiltration susceptible de transiter à travers la couche d'étanchéité,
 - à limiter les variations de teneur en eau de la couche d'étanchéité.

6.2. CONDITIONS D'UNE BONNE EFFICACITÉ DU DRAINAGE

La couche de drainage doit en pratique être considérée et dimensionnée comme un complexe constitué d'un ensemble de sous couches, ayant chacune une fonction élémentaire à assurer et qui participent ensemble à la fonction drainage. Ce complexe peut combiner matériaux synthétiques et/ou naturels.

Les points essentiels auxquels il convient de porter attention sont :

- la capacité de drainage du complexe de drainage est dimensionnée en fonction de la géométrie de la couverture (pentes, ...), et des conditions climatiques du site (flux à drainer) ;
- le dimensionnement doit porter sur l'ensemble du complexe drainant, placé dans ses conditions de service (en intégrant notamment les effets du poids des couches sus-jacentes de la couverture, les caractéristiques des matériaux, avec par exemple la granulométrie des matériaux naturels) ;
- la pérennité de la fonction drainante. La couche drainante doit être préservée d'un colmatage par migration de particules fines provenant des couches sus-jacentes. L'utilisation de dispositifs de filtration et de géotextiles anti-contaminant associés permet de pallier à ce type de risque ;
- la continuité de la couche drainante, synonyme de continuité de la fonction drainage notamment au niveau de l'exutoire du drainage.

6.3. DRAINAGE PAR DES MATÉRIAUX GRANULAIRES

6.3.1. Nature des granulats

Les matériaux granulaires utilisés dans une couche de drainage peuvent être d'origine naturelle c'est à dire qu'ils proviennent de roches ou d'alluvions n'ayant subi que des transformations mécaniques (concassage ou criblage) ou artificielle.

Quelle que soit l'origine des granulats, il convient de s'assurer que les eaux ayant percolé au travers de la couche drainante respectent les seuils de rejets des eaux superficielles dans le milieu naturel autorisés pour le site.

6.3.2. Caractéristiques physico-chimiques d'un granulat

Les caractéristiques principales d'un granulat sont sa granularité, sa perméabilité et sa tenue dans le temps. La perméabilité d'un granulat est liée à sa granularité, à sa forme et à son angularité. Sa tenue dans le temps dépend de son altérabilité et de sa résistance mécanique.

La granularité

Elle s'obtient par tamisage (Norme NF EN ISO 17892-4) et s'exprime sous la forme d'une courbe granulométrique à partir de laquelle on détermine :

- le calibre d/D : d et D étant respectivement les dimensions minimum et maximum des grains ;
- les diamètres D_{10} , D_{50} , D_{90} : dimension des grains tel que 10, 50 ou 90 % des grains ont un diamètre moyen inférieur à cette valeur. Le D_{50} représente la taille moyenne des grains ;
- la teneur en particules fines : tamisat à 80 μm (Classification SETRA, 1992) ;
- le coefficient d'uniformité $C_u = D_{60}/D_{10}$. Un granulat bien classé (uniforme) possède une courbe granulométrique resserrée et un $C_u < 4$. La courbe est étalée dans le cas contraire.

La perméabilité dépend directement de la granularité. On pourra notamment s'appuyer sur les valeurs approximatives suivantes :

Cailloux	D_{50} de 20 à 200 mm	$K > 10^{-2}$ m/s
Graviers	D_{50} de 2 à 20 mm	K de 10^{-2} à 10^{-3} m/s
Sables	D_{50} de 50 μm à 2 mm	K de 10^{-3} à 10^{-6} m/s

Tableau 4 : Valeurs indicatives de perméabilité de granulats en fonction de la granularité.

À diamètre médian (D_{50}) égal, un granulat bien classé sera plus perméable qu'un granulat mal classé (présence d'éléments fins), mais la cohésion de la couche drainante sera moins élevée.

L'angularité

L'angularité exprime la proportion d'arêtes vives et émoussées. En général, on se contente de distinguer les granulats concassés (concassage de produits de carrière ou d'alluvions) des granulats roulés provenant directement de gisements alluvionnaires sans concassage.

La perméabilité

La perméabilité du matériau conditionne la transmissivité de la couche de drainage.

La valeur de perméabilité réglementaire pour la couche de drainage des couvertures d'ISDD est de $K \geq 1.10^{-4}$ m/s. Pour le cas des couvertures d'ISDND, aucune valeur de perméabilité n'est imposée par la réglementation. Il conviendra de dimensionner cette valeur en fonction des caractéristiques du projet.

La dégradabilité

Il s'agit de la capacité du matériau à produire des particules fines sous l'action de l'eau d'infiltration. Celles-ci peuvent être présentes initialement dans le matériau ; leur présence doit être évitée le plus possible (teneur initiale < 2 % environ) en veillant à la propreté du granulat (normes NF EN 933-8+A1). Un certain nombre de tests normalisés complémentaires peuvent être employés à cet effet :

- teneur en minéraux argileux : essai au bleu de méthylène NF P 18-592 et NF 933-9 ;
- teneur en matière organique : NF ISO 10694 et NF EN 1744-1 ;
- teneur en fines : tamisat à 80 μm (classification SETRA, 1992).

La production de particules fines dépend de la minéralogie du granulat. La présence d'une proportion trop importante d'éléments phylliteux doit être évitée d'une manière générale puisqu'elle est source de particules fines. Un essai normalisé permet de mesurer la dégradabilité d'un matériau granulaire et par là d'éliminer les granulats comportant trop d'éléments schisteux ou phylliteux (NF P 94-067).

Les particules fines peuvent être produites par l'action répétée du gel. On évalue la sensibilité d'un granulat au gel par un essai de gélivité (NF P 18-593 et NF EN 1367-1).

La résistance mécanique

La sollicitation mécanique des granulats peut provoquer un phénomène d'effritement des grains qui entraîne l'apparition de particules fines. Des essais spécifiques permettent de quantifier l'apparition de particules fines en fonction d'une sollicitation mécanique :

- essai de friabilité des sables NF P18-576 sur la fraction sableuse de 0 à 2 mm ;
- essai micro-Deval NF P18-572 sur la fraction gravillonnaire de 6.3 à 14 mm ;
- essai de fragmentabilité NF P 94-066.

Altérabilité Chimique

Des réactions de dissolution/précipitation peuvent intervenir lorsque certains granulats se trouvent au contact de l'eau. En couverture, les solutions au contact des granulats ne sont *a priori* pas agressives (acides, alcalines ou riches en sulfates).

6.3.3. Critères de sélection d'un matériau granulaire

Le Tableau 5 récapitule les critères de sélection conseillés pour le choix d'un matériau granulaire naturel. Ces valeurs s'inspirent des recommandations du SETRA (1992) pour l'utilisation de granulats dans les remblais routiers et les couches de forme. Les caractéristiques minimales d'un matériau drainant y sont figurées en bleu.

En ce qui concerne les granulats d'origine artificielle, des précautions supplémentaires doivent être prises en vue de leur emploi. Celles-ci sont récapitulées dans le Tableau 6, qui s'appuie sur la classification édictée par le SETRA. Par rapport à cette dernière, ont été éliminés les sous-produits industriels contenant intrinsèquement une quantité trop importante de fines, de matière organique ou d'éléments particulièrement solubles.

Paramètres		Normes ou essais	Valeurs conseillées	Commentaires	Test : Préconisé +++ Conseillé ++ Indicatif +
Perméabilité		NF P 98-254-4	$K \geq 1.10^{-4}$ m/s (ISDD)	Peut être déterminée avec la formule de Hazen	+
Granulométrie		NF P 94-056 NF EN 933-1	Selon perméabilité envisagée	Granularité sélectionnée en fonction de la transmissivité recherchée	+++
Dégradabilité		NF P 94-067	DG < 5		+++
% Fines		NF P18-591 NF P18-597	Tamisé à 80 µm < 10 %	Condition pour un granulat « propre »	+++
Altérabilité physique	% Matière organique	NF ISO 10694 NF EN 1744-1	% MO < 3 %		++
	Fraction argileuse	Essai au bleu de méthylène NF P 18-592	VBS < 0,1g/100 g		++
	Sensibilité au gel-dégel	NF P 18-593		Paramètre indicatif peu contraignant pour les matériaux granulaires	+
Altérabilité chimique	Potentiel polluant	NF X 31-210 NF ENV 12-290			+++
	Friabilité des sables	NF P 18-576	FS < 60	Sur la fraction de 0 à 2 mm	++
Résistance mécanique	Friabilité des granulats	Essai micro-Deval NF P 18-572	MDE < 45	Sur la fraction de 6,3 à 14 mm	+
Fragmentabilité		NF P 94-066	FR < 7		+++

Tableau 5 : Critères de sélection d'un matériau granulaire pour une couche de drainage.

Famille de matériaux	Symbole	Paramètres significatifs vis à vis du réemploi	Autres paramètres significatifs
Matériaux de démolition	F71 (Matériaux valorisables)	Qualité du déferraillage, du criblage et de l'homogénéisation. Présence d'éléments indésirables (plâtres, bois, ...)	Potentiel polluant : Le matériau doit rentrer dans la catégorie V définie par la norme NF X 31-210
Autres	F	Paramètres à définir à l'appui d'une étude spécifique	Potentiel polluant : Le matériau doit rentrer dans la catégorie V définie par la norme NF X 31-210

Tableau 6 : Critères de sélection supplémentaires en vue de l'utilisation de granulat d'origine artificielle d'après la classification SETRA (1992).

6.4. MATÉRIAUX GÉOSYNTHÉTIQUES ET GÉOCOMPOSITES DRAINANTS

6.4.1. Rappel de quelques définitions

- le fascicule n° 11 du CFG définit les principales familles de matériaux manufacturés qui peuvent assurer ou intervenir dans une fonction de drainage :
 - **géospaceur** : structure polymère tridimensionnelle utilisée dans les applications de géotechnique et de génie civil, permettant de maintenir l'espace entre deux matériaux notamment en vue d'un drainage,
 - **géotextile** : matériau perméable, qui peut être tissé, non tissé ou tricoté, utilisé dans les applications de géotechnique et de génie civil,
 - **géocomposite de drainage** : matériau composite comprenant au moins l'un des géosynthétiques suivants : géotextile, géospaceur.

Le fascicule 11 précise que la fonction drainage peut être assurée soit par un géospaceur ou un géotextile, soit par un géocomposite manufacturé. Notons toutefois que les **performances optimales sont obtenues avec les géocomposites de drainage**.

6.4.2. Caractéristiques générales des produits de drainage géosynthétiques

Les complexes de drainage constitués de produits manufacturés comportent généralement une âme drainante (constituée souvent d'un géospaceur destiné à transporter l'eau), associée à un ou deux géotextiles assurant notamment la filtration.

Les structures de protection et les structures support peuvent être constituées soit par des sols soit par des géosynthétiques.

Les géotextiles, compte tenu de leur faible épaisseur, sont particulièrement sensibles au risque de colmatage et leur capacité de débit dans le plan devient alors faible même sous des contraintes mécaniques modérées. Leur utilisation comme couche drainante n'est pas recommandée.

Pour des raisons d'homogénéité des performances des produits et de contrôle de fabrication, il est nécessaire de privilégier les géocomposites assemblés en usine plutôt que l'utilisation des complexes assemblés sur chantier. La présence de toute discontinuité (notamment dans les zones de raccordement) influera de façon importante sur la transmissivité globale.

Le Tableau 7 présente les principales familles de géosynthétiques de drainage, avec en parallèle des éléments relatifs à leurs conditions d'utilisation possibles en tant qu'âme drainante dans un géocomposite complexe de drainage des eaux météoriques.

À noter que si l'âme drainante est continue (ex. PEHD extrudé), ce type de drainage ne sera pas compatible avec la fonction « semi-perméable » d'une couverture. D'autre part, le respect du sens de tuilage est capital au fonctionnement de ce type de produit et doit être garanti à terme.

Géosynthétiques			Fonction : drainage des eaux	
			Recommandé	Non recommandé
Géocomposite de drainage	Géospaceur associé à un ou deux filtres géotextiles	Ame alvéolaire thermoformée associée à un ou deux géotextiles	X	
		Monofilament continu enchevêtré associé à un ou deux filtres géotextiles généralement aiguilletés	X	
		Grille extrudée associée à un ou deux filtres géotextiles	X	
	Géotextile drainant dans lequel sont insérés des éléments discrets (mini-tubes, bandelettes, ...)			
Géotextile				X

Tableau 7 : Géosynthétiques de drainage des eaux météoriques.

6.5. ÉLÉMENTS DE DIMENSIONNEMENT DE LA COUCHE DRAINANTE

6.5.1. Transmissivité et capacité de débit dans le plan

La caractéristique essentielle des matériaux drainants est la transmissivité (matériaux granulaires) ou la capacité de débit dans le plan (géosynthétiques). Cette dernière est mesurée à l'aide d'un essai normalisé (NF EN ISO 12-958) applicable aux seuls produits manufacturés.

Les paramètres qui doivent guider le choix et le dimensionnement d'un matériau drainant, utilisé en couverture pour la collecte des eaux météoriques, sont :

- le débit de fluide à évacuer (notion qui fera intervenir pour partie le climat local) ;
- le type de couverture qui doit être mis en place (étanche, semi perméable, utilisant des matériaux naturels et/ou des produits manufacturés) ;
- la charge et les sollicitations mécaniques induites par le poids de la couverture ;
- les sollicitations mécaniques liées aux déformations (tassements) du massif de déchets ;
- les caractéristiques géométriques du site (configuration, forme, dimensions, hauteurs de déchets, pentes de la couverture).

De la prise en compte de l'ensemble de ces paramètres vont découler des indications relatives à la nature des matériaux utilisables, leurs caractéristiques hydrauliques, leurs caractéristiques mécaniques, les épaisseurs à prendre en compte, les associations et combinaisons possibles.

On rappellera que dans le cas d'un géocomposite drainant, **la capacité de débit dans le plan devra être définie pour le produit fini en situation de contrainte (confinement)**. Il faut porter une attention particulière à la représentativité de l'essai de capacité de débit dans le plan au regard des conditions réelles d'utilisation du produit (surfaces de contact, gradient, contrainte).

Par exemple, dans le cas d'une couverture comportant une géomembrane, l'essai mousse/plaque rigide est recommandé alors que dans le cas contraire, on retiendra l'essai mousse/mousse.

6.5.2. Approche simplifiée

La Figure 8 présente un schéma du fonctionnement hydraulique d'une couche de drainage.

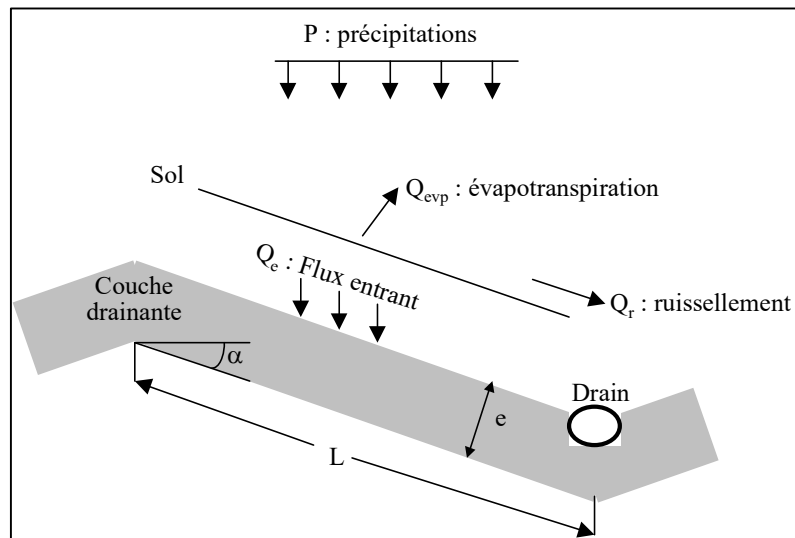


Figure 8 : Représentation schématique du fonctionnement hydraulique de la couche drainante (modifié d'après McEnroe, 1994 ; Cancelli et Rimoldi, 1994).

Une certaine quantité de pluie P tombe sur le sol de la couverture. Une partie des précipitations Q_r ruisselle le long de la pente pour être collectée au niveau du drainage latéral. Une autre partie Q_{evp} est éliminée par évapotranspiration au niveau du couvert végétal. C'est le flux restant Q_e qui est collecté par la couche drainante et évacué par la tranchée drainante.

6.5.3. Estimation du débit d'eau à évacuer

Définition d'une pluie de projet

Afin de définir la quantité d'eau à évacuer au sein du dispositif de drainage, il convient préalablement de définir une intensité de précipitation (pluie de projet) au droit de l'ouvrage.

Cette intensité de précipitation est définie selon la loi de Montana :

$$i(t) = a.t^{-b}$$

Avec

- $i(t)$: intensité moyenne de l'averse de durée t pour une période de retour T , exprimée en mm/min ;
- t : durée de la pluie (min) ;
- a et b : coefficients de Montana pour une période de retour T et pour la localisation du projet.

Pour le dimensionnement de la couche de drainage de couvertures d'ISD, on pourra retenir les hypothèses de l'Instruction Technique 77-284 relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations :

- a et b pour une période de retour $T=10$ ans, selon région (voir Figure 9) ;
- $5 < t < 120$ min.

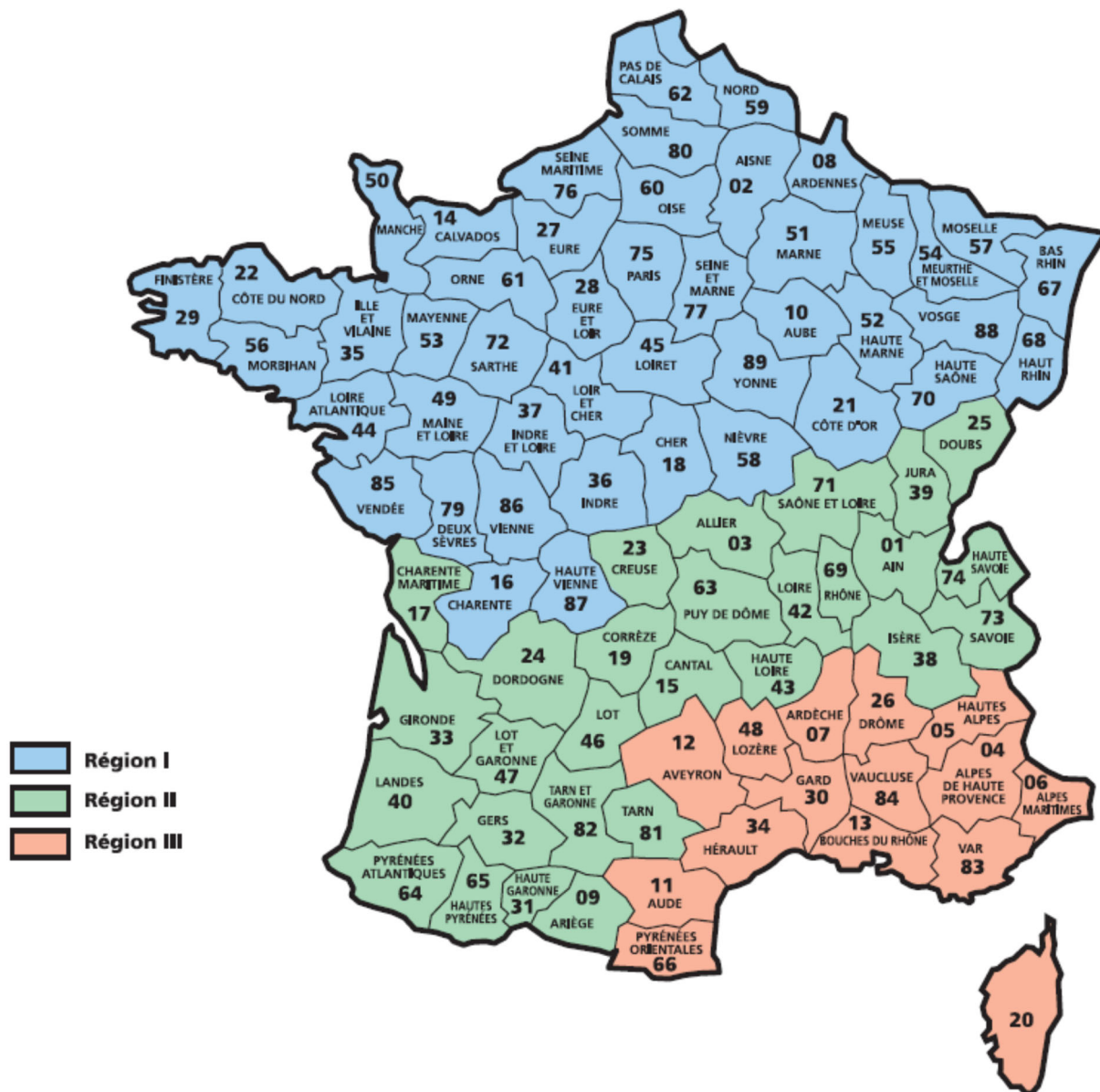


Figure 9 : Carte des régions de pluviométrie homogène.

Selon cette même instruction, les valeurs de coefficients de Montana à en prendre en compte sont :

- Région I : a =5,9, b =0,59 ;
- Région II : a =6,7, b =0,55 ;
- Région III : a =6,4, b =0,44.

Enfin, l'intensité $i(t)$ étant exprimée en mm/min, le débit q_r de précipitation par unité de surface horizontale, exprimé en m/s (ou $m^3/s.m^2$) est déterminé par la formule :

$$q_r = \frac{i(t)}{60000}$$

Débit d'eau à évacuer

Pour un débit q_r de précipitation par unité de surface horizontale atteignant la surface de la couverture, le débit q_d à drainer varie en fonction de la pente de la couverture et de la nature des matériaux recouvrant la couche de drainage (ruissellement et infiltration).

$$q_d = 1,5 \cdot q_r \cdot f \cdot \cos\beta$$

Avec

- 1,5 : coefficient de sécurité prenant en compte les incertitudes sur les débits infiltrés ;
- β : angle de la pente (en °) ;
- f : taux d'infiltration, pris égal par défaut à 0,5.

6.5.4. Dimensionnement d'une couche de drainage en matériaux granulaires

En prenant comme hypothèse que le massif drainant est saturé sur toute son épaisseur, le débit maximal dans une couche drainante granulaire est :

$$Q_{GR} = \frac{k(L \cdot \sin\beta + e)^2}{L}$$

Avec

- k : perméabilité du matériau granulaire en place (m/s) ;
- L : longueur du rampant (m) ;
- e : épaisseur de la couche drainante (m) ;
- β : angle de la pente (°).

La perméabilité k et l'épaisseur e de la couche drainante devront être dimensionnées afin que :

$$Q_{GR} \geq 1,35 \cdot q_d \cdot L \cdot \cos\beta$$

Une majoration de 35 % est appliquée afin de prendre en compte les incertitudes sur la qualité et la mise en œuvre du matériau ainsi que sur son évolution dans le temps (altération, colmatage, etc.) et éviter la mise en charge de l'intégralité de la couche drainante.

6.5.5. Dimensionnement d'une couche de drainage en géosynthétique

Conformément à la norme NF G 38-061, le géosynthétique de drainage retenu devra permettre de drainer un débit de dimensionnement QD tel que :

$$QD \geq q_d \cdot L \cdot \cos\beta$$

Avec :

- q_d : débit à drainer (m/s) ;
- L : longueur du rampant (m) ;
- β : angle de la pente (°).

La capacité de débit dans le plan du géosynthétique retenu, est au-moins égale à ce débit de dimensionnement, affecté de coefficients liés au produit.

7. Fonction filtration

7.1. ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX

Les écoulements à l'intérieur d'un sol, qu'ils soient à sens unique ou alternés, peuvent conduire à des phénomènes de déstabilisation et d'entraînement des particules (grains) qui le composent. Pour lutter contre ce phénomène et ses effets déstabilisants, il est nécessaire de mettre en place un dispositif de filtration à l'interface entre deux milieux de granulométries différentes, notamment entre la couche de drainage et les couches sus-jacentes.

Cependant, le rôle du filtre ne doit pas se limiter simplement à retenir toutes les particules transportées dans l'écoulement, ce qui conduirait à son colmatage par accumulation de particules à sa surface ou dans sa structure (avec en corollaire une diminution progressive de sa perméabilité). Le filtre doit en outre empêcher le sol dans son ensemble (à l'exception des particules très fines) de se mettre en mouvement.

Le filtre doit satisfaire, de manière simultanée, aux trois critères suivants :

- critère de rétention : le filtre doit maintenir le squelette du sol en stabilisant ses plus grosses particules à l'interface de contact, permettant la constitution d'un auto filtre granulaire ;
- laisser passer les particules fines instables, afin d'éviter un colmatage du système de filtration ;
- critère de perméabilité : le liquide doit s'écouler librement à travers le filtre, sans que celui-ci n'induisse de pertes de charge significatives.

« Le dimensionnement du filtre sera donc le résultat d'un compromis entre une structure peu ouverte, dont les ouvertures sont de petites dimensions pour retenir les particules de sol, définie à partir d'un critère de rétention, et une structure perméable pour ne pas provoquer de perte de charge qui puisse nuire à l'écoulement, définie à partir d'un critère de perméabilité » (Faure, 2000).

7.2. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement d'un géosynthétique de filtration fait l'objet de la norme NF G38-061.

7.2.1. Critères liés au matériau sus-jacent

La sélection d'un géosynthétique filtrant adapté au projet de couverture nécessite une connaissance préalable des matériaux constitutifs des couches qui le surmontent (couche de végétalisation, anti-intrusion, anti-érosion, ...) portant *a minima* sur les caractéristiques suivantes :

- la granularité, définie par les paramètres d_{10} , d_{60} et le coefficient d'uniformité $C_u = d_{60}/d_{10}$;
- l'équivalent de sable déterminé selon la norme NF EN 933-8 ;
- l'argilosité du sol, définie par l'indice de plasticité I_p ou la valeur au bleu VBS (voir norme NF P 11-300) ;
- le coefficient de perméabilité k_s des matériaux sus-jacents.

7.2.2. Critères liés au géosynthétique

Les critères nécessaires au bon dimensionnement d'un géosynthétique de filtration sont :

- résistance à la pénétration de l'eau, exprimée par la hauteur de la colonne d'eau (en mm) nécessaire pour produire un écoulement continu de gouttelettes au travers du géosynthétique. On retiendra une hauteur de colonne d'eau maximale de 5 mm ;
- la perméabilité du géosynthétique, exprimée en vitesse d'écoulement perpendiculaire au plan, sous une charge hydraulique de 50 mm (V_{H50}). Dans le cadre des couvertures d'ISD, on sélectionnera un géosynthétique tel que $V_{H50} \geq 100 \cdot k_s \cdot i_s$, avec k_s le coefficient de perméabilité des sols sus-jacents et i_s le gradient hydraulique dans ces sols, supposé unitaire ($i_s=1$) ;
- critère de non rétention des fines, garant de l'absence de colmatage du filtre, exprimé par l'ouverture de filtration O_{90} du géosynthétique selon la norme NF En ISO 12956. On retiendra $O_{90} \geq 63 \mu\text{m}$;
- critère de rétention du squelette des sols sus-jacents. On sélectionne O_{90} tel que $O_{90} \leq 120 \mu\text{m}$.

8. Fonction renforcement mécanique et stabilité du dispositif de couverture

Note préalable : la stabilité en grand du massif de déchets est supposée vérifiée et acquise. Le présent guide n'aborde que la stabilité du dispositif multicouche de couverture vis-à-vis de glissements inter couches.

8.1. STABILITÉ DES INTERFACES ENTRE LES COUCHES

La stabilité sur pente d'une structure de couverture dépend notamment de la résistance mécanique des interfaces entre les différentes couches qui constituent cette structure. La stabilité de l'ensemble de la couverture peut être garantie, si celle du multicouche constituant la couverture et celle du massif des déchets sous la couverture sont assurées.

La stabilité du multicouche de couverture est conditionnée par de nombreux facteurs :

- caractéristiques mécaniques aux interfaces de chaque couche (drainage, étanchéité, support...) ;
- types et caractéristiques des matériaux naturels ou synthétiques employés ;
- inclinaison et longueur des pentes de la couverture ;
- épaisseur du sol de couverture ;
- teneur en eau.

Le principe de cette stabilité de l'ensemble des couches de la couverture est illustré par la Figure 10. Plusieurs mécanismes de stabilité sont à étudier :

- stabilité propre de la couche de recouvrement dans son épaisseur, liée aux paramètres de cisaillement du matériau de recouvrement. Le matériau doit être sélectionnée en fonction de la pente ;
- stabilité au glissement des différentes interfaces en considérant :
 - l'interface sol de recouvrement/DEDG. Si nécessaire un dispositif d'accrochage peut être requis,
 - l'interface interne au DEDG. Si nécessaire, une nappe de renforcement peut être requise.

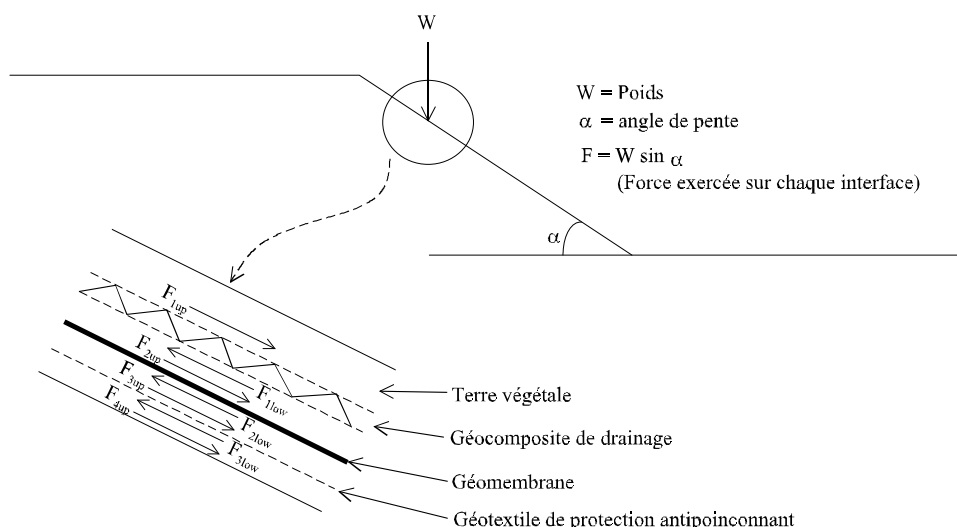


Figure 10 : Stabilité mécanique à vérifier pour chaque interface.

La stabilité de la couverture peut être assurée par différents moyens tels que :

- l'adaptation de la géométrie de la couverture ;
- la mise en place de risbermes et d'ancrages intermédiaires ;
- l'utilisation d'un géosynthétique de renforcement.

Cette stabilité doit être évaluée selon les recommandations de la norme NF G 38-067. Chaque interface de glissement fait l'objet d'un calcul de vérification qui peut aboutir à :

- une validation du dispositif de couverture ;
- une adaptation des caractéristiques de cisaillement de l'interface pénalisante ;
- une adaptation de la géométrie de l'ouvrage (épaisseur des couches, adoucissements des pentes, risbermes) ;
- la mise en œuvre d'une solution de renforcement.

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

Les paramètres de cisaillement d'interface sont l'adhésion (qui peut s'apparenter à de la cohésion) et l'angle de frottement. Ils peuvent être déterminés à partir des 3 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, où la stabilité de la couverture 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 5 kPa ou selon la méthode de la boîte de cisaillement (NF EN ISO 12957-1) pour des contraintes normales supérieures à 5 kPa. Les conditions d'essais doivent être représentatives des conditions réelles de terrain.

La norme NF G 38-067 prend en compte uniquement le frottement d'interface pour les calculs de stabilité. En première approche, on appliquera les recommandations et méthodes de calcul de la norme. Le Tableau 9 de la norme NF G 38-067 présente ainsi des valeurs de coefficient de frottement usuelles. Toutefois, la méthodologie de cette norme est conservatrice et, dans certains cas spécifiques, il pourra être nécessaire de prendre en compte l'adhésion dans les calculs de stabilité, notamment dans le cas où des produits synthétiques à surface texturée sont mis en œuvre.

Nature des interfaces	Angle de frottement $\delta_{b;k}$
Géomembrane PEHD lisse/Non tissé de protection	6° à 10°
Géomembrane PP/Non tissé de protection	9° à 14°
Géomembrane PVC/non tissé de protection	15° à 22°
Géomembrane bitumineuse face lisse/ Non tissé de protection	16° à 20°
Géomembrane EPDM / Non tissé de protection	15° à 22°
Géomembrane PEHD lisse / Géosynthétique bentonitique	6° à 10°
Géomembrane texturée / Non tissé de protection	15° à 25°

Tableau 8 : Exemples d'angles de frottements d'interface mesurés sous des contraintes de compression comprises entre 5 et 15kPa entre une géomembrane et différents types de géotextiles (source : AFNOR NF G 38-067).

8.2. RENFORCEMENT MÉCANIQUE DE LA COUVERTURE

La solution la plus courante pour renforcer mécaniquement un dispositif de couverture vis-à-vis des glissements aux interfaces, consiste à utiliser des géosynthétiques de renforcement. Ces matériaux, qui ont une rigidité et une résistance en traction plus élevée que les autres composantes géosynthétiques, reprennent les efforts de traction pour une déformation très faible. Étant donné que des déformations plus importantes sont nécessaires pour la mobilisation de la résistance au cisaillement aux interfaces, les autres composantes de la couverture ne subissent pas de traction.

Le dimensionnement des géosynthétiques de renforcement, dans le cas des couvertures d'ISD, peut être réalisé en s'appuyant sur la norme NF G 38-067 relative à la stabilisation des couches de sols minces sur pente.

Cette norme s'applique :

- aux talus d'inclinaison constante ;
- aux dispositifs dont l'épaisseur totale des couches recouvrant le géosynthétique de renforcement n'excède pas 5 % de la longueur du rampant ;
- à des structures soumises uniquement à des sollicitations statiques dont la contrainte normale permanente est inférieure à 20 kPa.

Basée sur les Eurocodes, elle permet de définir les combinaisons d'actions à retenir et de calculer la résistance à la traction du géosynthétique de renforcement et les dimensions du dispositif d'ancrage pour une couverture donnée, en intégrant des facteurs de sécurité liés au projet, et des coefficients de réduction liés aux spécificités des géosynthétiques envisagés.

Dans le cadre spécifique du renforcement des couvertures d'ISD, les hypothèses suivantes, nécessaires à l'application de la norme NF G 38-067, pourront être prises en compte :

- catégorie de durée d'utilisation de projet : 3 (25 ans) ;
- classe de conséquence : CC1 ;
- combinaisons d'action : combinaisons fondamentales de projet durable par défaut, combinaisons accidentelles en cas d'événement neigeux, combinaisons sismiques le cas échéant (zones sismiques 4 et 5) ;
- actions permanentes : poids des couches surplombant le renforcement ;
- actions variables : couche de neige le cas échéant (zonage enneigement) ; circulation d'engins légers d'entretien de la végétation.

9. Fonction anti-érosion

9.1. FACTEURS INFLUENÇANT L'ÉROSION

Une couverture de site de stockage doit être conçue de manière à résister aux agressions climatiques. L'altération engendrée par les facteurs climatiques est causée principalement par l'érosion. En France, sauf situations particulières (bordure côtière, altitude), le principal mécanisme d'érosion est l'érosion hydrique.

L'érosion hydrique correspond au détachement et au transport de particules du sol depuis un emplacement initial vers un point de dépôt. Sur une couverture de site de stockage, l'érosion dépend de plusieurs facteurs :

- la fréquence et l'intensité des précipitations. Le choc des gouttes d'eau sur le sol détache des particules qui sont transportées plus loin ;
- l'état d'humidité initial du sol. L'impact des gouttes d'eau augmente avec l'humidité du sol. Il est maximal lorsque le sol est saturé et qu'une lame d'eau d'épaisseur voisine du diamètre des gouttes se forme ;
- le type de ruissellement. Un ruissellement diffus, constitué de minces filets d'eau, a un pouvoir érosif réduit. Un ruissellement concentré est responsable du creusement de chenaux et d'une érosion importante ;
- les caractéristiques physiques du sol. La présence de matière organique permet une bonne agrégation des particules et le sol devient moins érodable. Les sols deviennent également moins érodables lorsque la fraction de limon diminue, en faveur de la fraction sableuse grossière ou bien argileuse ;
- la pente et la longueur de la pente. Le ruissellement augmente notamment avec l'angle de la pente ;
- la rugosité de la couche superficielle, qui influence le ruissèlement ;
- la présence et le type de couverture végétale. La végétation amortit l'impact des gouttes sur le sol et forme des obstacles au ruissellement ;
- la situation géographique du site, influençant l'érosivité des pluies (voir Figure 11).

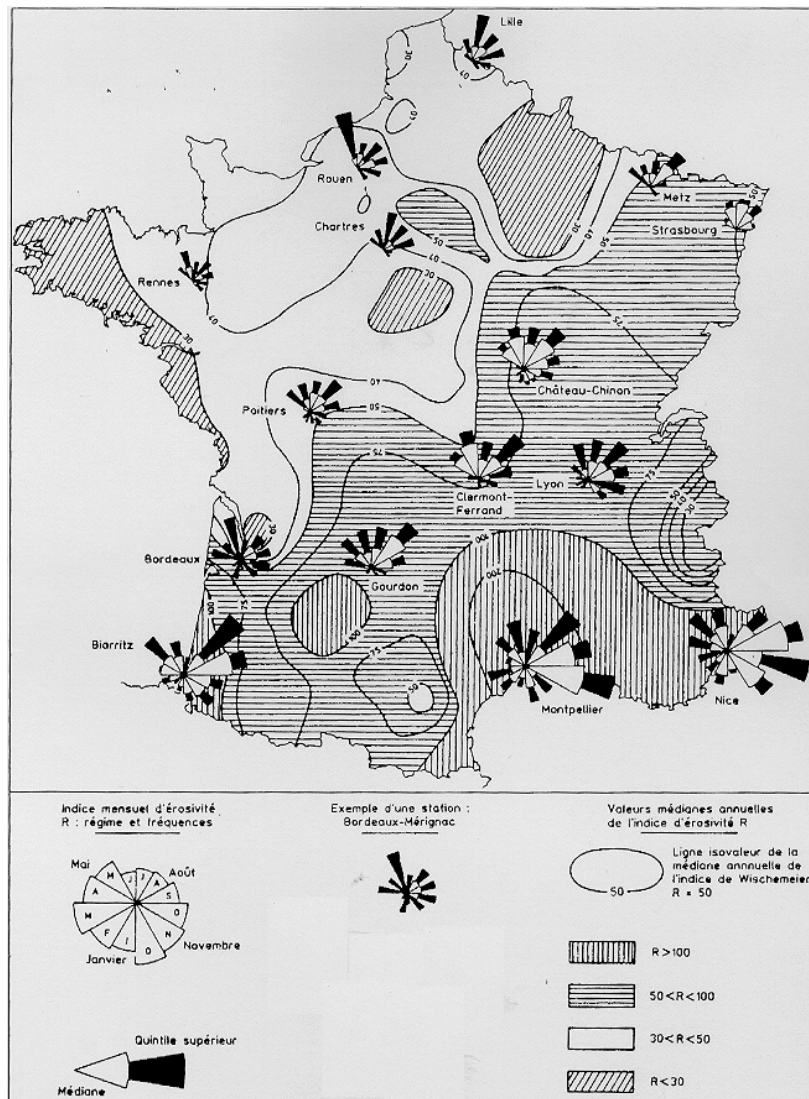


Figure 11 : Carte de France de l'érosivité des pluies (Pihan, 1986).

9.2. PRÉVENTION DE L'ÉROSION

La prévention de l'aléa « érosion » sur les couvertures de sites de stockage de déchets passe par un choix de modelé de couverture destiné à réduire la force érosive de l'eau, par l'implantation d'une végétation appropriée, ou par l'utilisation de certains matériaux géosynthétiques.

9.2.1. Choix du modelé

Il sera indispensable de veiller à ce que le modelé et les pentes retenues soient compatibles avec les objectifs de stabilité à long terme de l'ouvrage et de maintien de l'intégrité de la couverture.

Pour un site et un type de couverture donnés, ces choix dépendront donc d'une part des caractéristiques des matériaux mis en œuvre et d'autre part des mesures d'accompagnement éventuelles. On peut tout à fait imaginer un projet d'aménagement qui favorise l'instauration de pentes fortes, si les caractéristiques des matériaux utilisés sont très supérieures aux valeurs classiques, ou si des mesures compensatoires sont prises pour compenser l'augmentation des sollicitations (moyens de lutte contre l'érosion sur les fortes pentes, mise en place de géotextiles de renforcement pour reprendre les efforts mécaniques, surdimensionnement des réseaux de drainage, ...). Ces choix se traduiront par une complexité accrue du dimensionnement de la couverture, et par des surcoûts.

La stabilité de la couverture et des talus devront nécessairement faire l'objet d'une vérification sur la base des caractéristiques des matériaux mis en œuvre.

Il apparaît souhaitable pour la plupart des sols de :

- privilégier des pentes suffisantes en partie supérieure de couverture pour favoriser l'écoulement et éviter l'apparition de contre-pentes (une valeur résiduelle de 3 % après tassements est un minimum) ;
- généraliser les pentes de talus n'excédant pas 33 % (1 m Vertical pour 3 m Horizontal) sur les flancs et éviter les pentes supérieures à 50 % (1 m Vertical pour 2 m Horizontal) qui nécessiteront l'utilisation de matériaux spécifiques ou la mise en place de dispositions compensatoires.

9.2.2. La végétalisation

La végétation réduit l'érosion par l'intermédiaire de plusieurs mécanismes :

- l'effet de battance et son action destructrice sont supprimés par interception des gouttes de pluie et absorption de leur énergie ;
- l'infiltration des eaux de pluie est accrue grâce à l'amélioration de la porosité et de la perméabilité du sol. Cela entraîne une diminution du ruissellement ;
- le système racinaire structure le sol et retient les particules ;
- les végétaux augmentent la rugosité du lit de ruissellement et en diminuent la vitesse ;
- la végétation sert de filtre naturel pour les particules du sol emportées par le ruissellement.

Un avantage considérable de la végétation en tant que moyen de lutte contre l'érosion tient au fait qu'elle se régénère naturellement. Le choix des espèces devra prendre en compte les contraintes énoncées dans le chapitre 10.

9.2.3. Les matériaux synthétiques

L'utilisation de matériaux synthétiques complète l'action antiérosive de la végétation de deux manières. Tout d'abord, par contrôle de l'érosion durant la période d'établissement de la végétation. Ensuite par renforcement et maintien de la structure de couverture en reprenant les contraintes mécaniques subies par les racines des plantes. Plusieurs types de matériaux peuvent remplir cette fonction antiérosive.

Les nattes biodégradables

Ce sont des nattes en fibres naturelles, le plus souvent en fibre de jute, coton, coco et autres déchets végétaux. La cellulose a une capacité importante d'absorption d'eau. Ainsi, la natte s'alourdit et empêche le détachement des particules du sol. Après la période de pluie, la natte maintient un certain taux d'humidité au niveau du sol et permet des conditions favorables à la croissance de la végétation.

La durée de vie de ces matériaux est courte : elles se dégradent au bout de quelques mois, ce qui nécessite d'avoir une végétation déjà bien implantée. Elles peuvent néanmoins s'avérer nécessaires pendant la période de prise de la végétation. La dégradation de la natte apporte des éléments nutritifs complémentaires à la végétation ce qui favorise son implantation. Ces nattes peuvent être utilisées en complément d'autres matériaux plus résistants comme les géogrilles.

Les nattes tridimensionnelles

Ce sont des géotextiles non tissés, épais, avec une porosité importante et composés de fibres épaisses. Ils peuvent être renforcés par des géogrilles fixées par fusion pour augmenter la résistance à la traction, et peuvent être ensemencés. Ces nattes jouent un rôle de système racinaire provisoire et maintiennent les particules de sol ainsi que la végétation naissante.

Lors de la mise en œuvre il faut veiller à ce que la natte soit bien fixée sur la pente afin de minimiser la traction dans la partie supérieure. Il faut également veiller à ce que le tissu soit bien plaqué sur le sol afin d'éviter les écoulements à l'interface.

Les géoconteneurs

Ce sont des structures en nids d'abeille qui stabilisent la couche superficielle du sol mais ne protègent pas de l'effet de battance. On peut les combiner avec les nattes tridimensionnelles.

10. Fonction support du couvert végétal

La couche support de la végétation assure, en réalité, plusieurs fonctions :

- elle sert de support à la végétation ainsi que de réserve en éléments minéraux et en eau ;
- elle limite l'infiltration de l'eau vers les couches inférieures ;
- elle atténue les conséquences des variations climatiques.

Cette couche peut être constituée de terre végétale naturelle, éventuellement amendée, issue du décapage des sols agricoles ou, de support végétal reconstitué à partir de matériaux valorisés. Cette deuxième option tend à se développer dans une logique d'économie circulaire et de préservation des ressources.

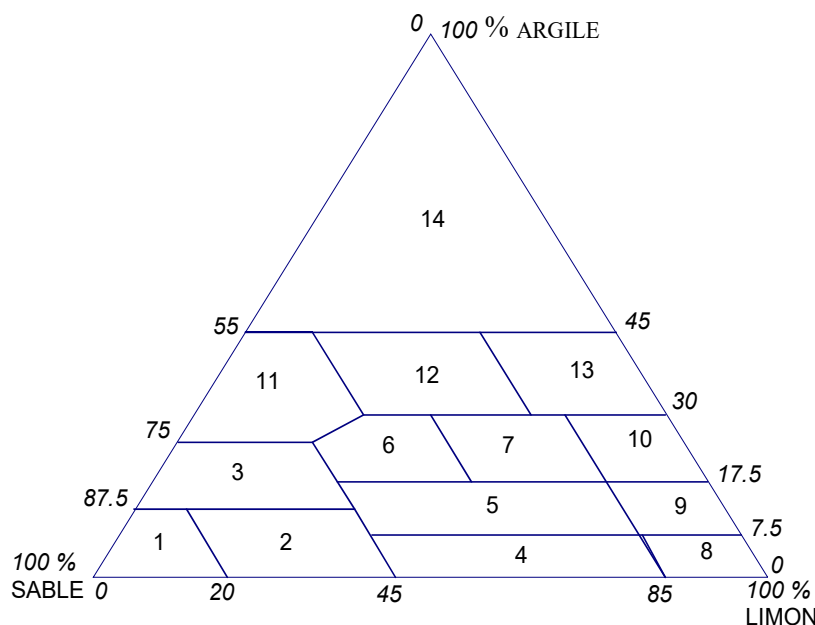
La couche de terre mise en place n'est pas compactée, afin de favoriser le développement des racines des plantes, et l'évapotranspiration. Une attention particulière sera apportée aux conditions de décapage et de stockage de la terre végétale, dans l'hypothèse d'une réutilisation sur le site, afin d'en conserver les caractéristiques de fertilité.

10.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES D'UN SOL

L'ensemble des propriétés physiques et chimiques du sol sont en liaison étroite avec la texture et la structure qui apparaissent comme deux facteurs clés de la fertilité.

10.1.1. La texture du sol

Elle correspond à la granulométrie des différentes particules constitutives. On peut classer ainsi les sols en différents groupes, représentés sur la Figure 12.



1. Sable ; 2. Sable limoneux ; 3. Sable argileux ; 4. Limon léger sableux ; 5. Limon moyen sableux ; 6. Limon sablo-argileux ; 7. Limon argilo-sableux ; 8. Limon léger ; 9. Limon moyen ; 10. Limon argileux ; 11. Argile sableuse ; 12. Argile ; 13. Argile limoneuse ; 14. Argile lourde.

Figure 12 : Diagramme de texture des sols.

Parmi l'ensemble des textures décrites dans la Figure 12, on distingue 4 types principaux :

- texture sableuse : sol bien aéré pauvre en réserves d'eau et en nutriments (1 à 4) ;
- texture limoneuse : l'excès de limon conduit à une structure massive qui peut être corrigée par un apport en humus et en calcium (8 à 10) ;
- texture argileuse : sol chimiquement riche mais imperméable et mal aéré formant obstacle à la pénétration des racines. Ces défauts peuvent être en partie corrigés par un apport d'humus (11 à 14) ;
- texture équilibrée (ou franche) : elle correspond au type le plus favorable dans la mesure où elle reprend l'ensemble des qualités des sols précédents sans en avoir les défauts (5 à 7).

En ce qui concerne le diamètre moyen des particules, la texture équilibrée correspond à un D_{50} compris entre 25 et 200 μm ce qui permet d'éviter les sols trop argileux (défavorables au développement racinaires faute d'aération) ou trop sableux (défavorables faute d'eau et de nutriments en raison du drainage important).

10.1.2. La structure et l'aération du sol

La structure désigne le mode d'assemblage des particules entre elles. Elle détermine la répartition dans l'espace de la matière solide et des vides (pores) dont certains sont occupés par l'eau et d'autres, plus grossiers, par de l'air. Elle conditionne l'ensemble des propriétés fondamentales du sol : aération et possibilité de respiration des racines, rétention par capillarité d'une réserve d'eau utilisable en période sèche, etc.

La porosité totale, c'est-à-dire le volume total des vides, offre la meilleure image de la structuration d'un sol. Elle se subdivise en capacité en air et capacité en eau. Elle est liée à deux grandeurs différentes :

- la densité réelle de la fraction solide D (ou masse volumique des grains ρ_s) souvent proche de 2,65 ;
- la densité apparente D' (ou masse volumique du sol sec ρ_d) est la densité du sol sec, comprenant matière solide et pores, variant entre 1 et 2.

La porosité totale est ensuite donnée par la formule :

$$P = \frac{D - D'}{D} * 100$$

La capacité en air est étroitement liée à la densité apparente par la formule suivante :

$$\text{Capacité en air (\%)} = \left(\frac{2.3 - D'}{0.3} \right)^2$$

Les valeurs limites communément admises pour une couche de support végétal sont :

- une capacité en air supérieure à 10 % et jamais inférieure à 5 % ;
- une porosité totale comprise entre 50 à 60 % et pas inférieure à 40 % ;
- une porosité totale répartie de la manière suivante : 1/3 de capacité en air et 2/3 de capacité en eau.

La présence de matière organique favorise l'agrégation en raison de sa réactivité chimique. Il en est de même pour les particules argileuses mais à plus de 30 % dans un sol, l'argile diminue la porosité totale.

Le pH idéal pour une bonne structuration est compris entre 5,5 et 7. Le calcium est également un agent agglomérant tandis que le sodium est un agent dispersant donc nuisible.

10.2. CARACTÉRISTIQUES BIOGÉOCHIMIQUES

10.2.1. La matière organique

La matière organique est une source d'alimentation pour les plantes en raison de sa progressive minéralisation qui libère des nutriments. Sa réactivité chimique fait qu'elle retient également un grand nombre de cations et d'anions sur ses sites de surface, qui deviennent ainsi également disponibles pour les plantes. Enfin, elle participe à la structuration du sol en permettant la formation d'un complexe organo-minéral stable qui agrège les particules entre elles. La formation de ce complexe doit beaucoup à la macrofaune du sol dont l'activité transforme et mélange la phase solide du sol. La matière organique se retrouve dans le sol sous deux formes : la matière organique fraîche (MOF) et l'humus provenant de la première par humification c'est-à-dire par décomposition partielle des molécules organiques par des agents microbiens. La MOF est apportée par la chute des feuilles dans les sols forestiers, et par la décomposition de la strate herbacée dans les prairies (incluant tiges, racines et exsudats racinaires). Pour les sols cultivés, la plupart de la biomasse produite est exportée si bien que des apports extérieurs sont nécessaires en vue de maintenir le stock de carbone organique du sol.

À terme, l'ensemble de la matière organique du sol se minéralise sous l'effet d'agents microbiens et/ou chimiques, libérant des ions SO_4^{2-} , PO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , etc., et du CO_2 gazeux. Son renouvellement est essentiel pour le maintien des propriétés attendues des couvertures d'installation de stockage de déchets.

La quantité totale de matière organique peut être globalement déterminée en dosant le carbone organique total (COT). Le taux de matière organique est alors estimé à 1,72 fois le taux de COT. Le stock global sous climat tempéré est de l'ordre de 10 à 20 kg/m^2 de sol.

10.2.2. Le rapport carbone/azote (C/N)

Un élément important de la MOF pour déterminer la fertilité d'un sol est le rapport carbone/azote (C/N). Plus ce rapport est bas, plus la composition de la MOF est favorable à une végétalisation, la matière organique étant la principale source de nitrates pour les végétaux. Dans la pratique, on préconisera un rapport C/N inférieur à 20.

10.2.3. Les amendements en matière organique

Lorsque des amendements en matière organique s'avèrent nécessaires (reconstitution de sols par exemple), il faudra s'assurer que l'impact polluant de ces amendements est conforme aux normes en vigueur, et que la charge minérale est compatible avec le développement du type de végétation retenu. En ce qui concerne l'usage des boues de station d'épuration, il doit suivre les règles fixées par la réglementation en vigueur (décret 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées).

Parmi les amendements organiques susceptibles d'enrichir le sol de couverture, on peut citer :

- composts de déchets verts ;
- composts de déchets ménagers ;
- boues de stations d'épuration ;
- boues de papeterie, ...

10.2.4. Le Ph

Dans la plupart des sols cultivés sous climat tempéré, le pH est contrôlé par la stabilité des carbonates, le CO_2 de l'air et la matière organique. L'optimum se situe entre 5,5 et 6,5. Lorsque le pH devient acide ($\text{pH} < 5,5$), on observe une désagrégation du sol. Lorsque le pH devient basique ($\text{pH} > 7$, cas des sols calcaires) on observe une insolubilisation du phosphore, de l'azote et de certains oligo-éléments.

10.2.5. Les éléments chimiques

Le Tableau 9 donne pour chaque élément ses effets bénéfiques vis-à-vis du sol ou des végétaux ainsi que les inconvénients de sa présence en trop fortes quantités.

Élément		Effets bénéfiques	Effets néfastes	Teneurs conseillées
N		Nutrition des plantes	Pollution en nitrates des eaux de ruissellement (moins de 50mg/l dans l'eau de ruissellement)	C/N < 20
P		Nutrition des plantes		C/P < 200
S		Nutrition des plantes	Toxique en milieu anaérobie Toxique sous forme de gaz SO ₂	Généralement en quantité suffisante dans la matière organique
Ca		Favorise l'activité biologique Neutralise l'acidité Favorise l'agrégation des particules Ralentit la biodégradation de la MOF	Limite la quantité d'autres cations comme Mg ou K	Généralement en quantité suffisante
Mg		Neutralise l'acidité Favorise l'agrégation des particules Nécessaire à la nutrition des plantes	Limite la quantité d'autres cations comme Ca ou K	Conseillé 0,5 meq/100g
K		Neutralise l'acidité Favorise l'agrégation des particules Nécessaire à la nutrition des plantes	Limite la quantité d'autres cations comme Ca ou Mg	Conseillé 0,5 meq/100g
Na			Pas nécessaire à la nutrition des plantes Limite la quantité d'autres cations comme Ca, K ou Mg L'hydrolyse des argiles sodiques augmente le pH	
Fe		Favorise l'agrégation	Toxique en milieu réducteur (Fe ²⁺)	Fe > 1000 mg/ha/an
Al		Favorise l'agrégation des particules	Très toxique en milieu acide (Al ³⁺) à pH < 5,5	Al/Ca < 1
Oligo-éléments	Mn Zn Cu B Mo	Nécessaires à la nutrition	Toxiques à trop fortes teneurs (Mn toxique en milieu acide)	150 à 700 100 à 300 25 à 100 80 à 200 5 à 20

Tableau 9 : Principaux éléments chimiques présents dans le sol.

10.3. LES SOLS RECONSTITUÉS

Les progrès récemment réalisés en génie pédologique permettent d'envisager la reconstitution de sols fertiles à partir de matériaux de base strictement minéraux et d'amendements organiques.

Parmi les matériaux envisageables pour la reconstitution de sols, on peut envisager, de mélanger en proportions variables (liste non exhaustive) :

- déblais stériles ;
- terres dépolluées ;
- sédiments de dragage ;
- déchets inertes (de déconstruction, de dragage) ;
- matériaux du site ou locaux, en fonction de leur nature (argileuse, sableuse, limoneuse) ;
- broyats de déchets verts ;
- composts.

Les proportions des mélanges doivent être définies au préalable. Elles dépendent des propriétés des matériaux sources et de celles souhaitées pour le matériau final. Ce dernier doit présenter les caractéristiques d'un sol propice à la végétalisation, résumées dans le Tableau 10. L'élaboration d'un tel mélange nécessite l'identification préalable de gisements de matériaux et peut demander la réalisation d'essais au laboratoire. Outre les caractéristiques pédologiques du Tableau 10, le matériau reconstitué devra également présenter des caractéristiques mécaniques (paramètres de cisaillement notamment) permettant de garantir sa stabilité en couverture.

Granulométrie	Porosité totale	Capacité en air	Argile (<2µm)	Matière organique	Rapport C/N	pH
25<D ₅₀ <200 µm	40%<P<60%	>P/10	< 30%	10 à 20 kg/m ²	<20	5,5 à 7,5

Tableau 10 : Synthèse des caractéristiques d'un sol pour végétalisation.

10.4. MISE EN ŒUVRE DE LA COUCHE DE VÉGÉTALISATION

Les matériaux retenus sont mis en place à l'avancement. En aucun cas les engins de transport ou de mise en œuvre ne peuvent circuler directement sur la couche de drainage.

Les engins intervenants pour la mise en place de la couche de végétalisation sont équipés de chenilles (trax, pelle mécanique). Des pistes d'au-moins 1 m d'épaisseur sont réalisées à l'avancement avec les matériaux à mettre en œuvre, puis ils sont répartis en reculant de part et d'autre de cette piste.

Pour ce qui concerne la manœuvre des engins, toute manœuvre brusque (freinage, demi-tour) est à proscrire afin d'éviter les risques de déstabilisation ou d'arrachement des couches sous-jacentes.

11. Traitement des points singuliers

Les points singuliers en interaction avec la couverture se situent principalement au niveau :

- du réseau de captage des biogaz et de pompage des lixiviats ;
- du réseau de gestion des eaux de surface.

11.1. INTERACTIONS AVEC LE RÉSEAU DE DRAINAGE DU BIOGAZ ET DE POMPAGE DE LIXIVIATS

Les interactions principales entre le dispositif de collecte des biogaz et la couverture se situent au niveau des sorties de drains ou puits, des purges et des supports de réseau.

On distinguera par la suite, la nature de la couverture - imperméable par Géomembrane (GMB) ou non - pour étudier les points singuliers liés au réseau de collecte du biogaz.

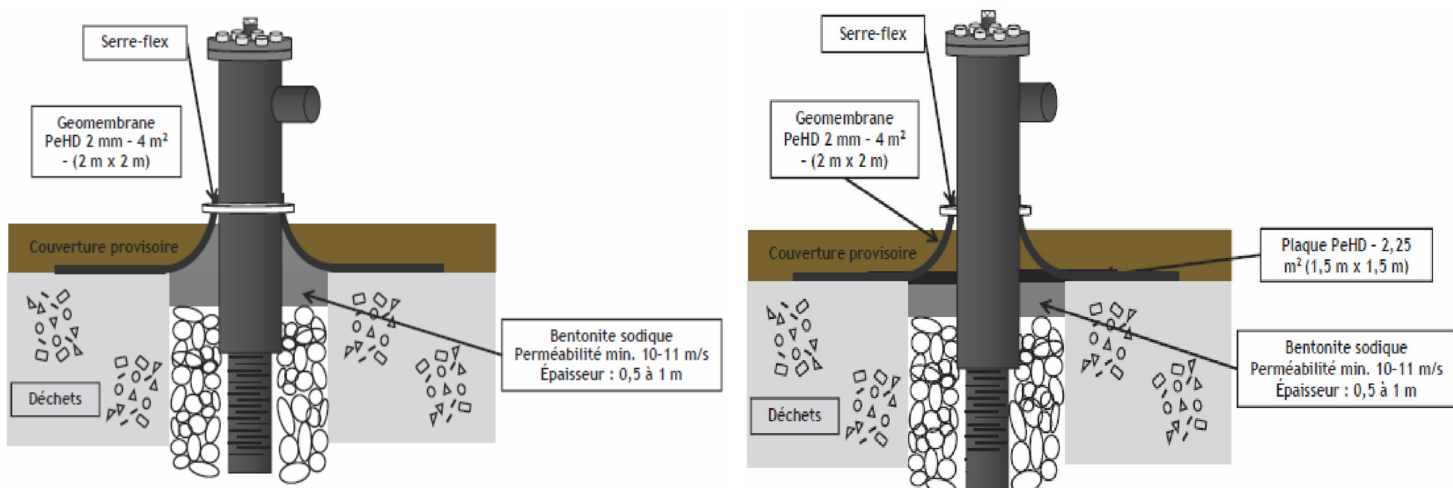
Dans tous les cas, lors de la réalisation de la couverture finale, les travaux de terrassements (et/ou de réalisation de l'étanchéité) et de réalisation du réseau doivent être rigoureusement étudiés et planifiés. Dans le cas idéal, le réseau de captage des biogaz est reconnecté chaque soir. On limitera à une surface de 10 000 m² (environ 5 puits de biogaz) la zone non collectée lors des travaux, et à une durée d'environ 10 jours (à adapter selon la quantité, la qualité du biogaz et le contexte local).

On prévoira un excédent de matériaux de couverture (butte) autour des puits afin d'anticiper les tassements, dont l'amplitude est nécessairement plus importante autour de ces ouvrages.

Dans le cas des couvertures étanchées par géomembrane, on veillera à assurer la continuité d'étanchéité de la couverture avec les puits, purges ou autre sortie, tout en permettant au point de raccordement de suivre les tassements différentiels du massif. Les points de raccordement ont donc deux objectifs : assurer une parfaite étanchéité entre la GMB et l'ouvrage, et permettre un mouvement vertical relatif entre l'ouvrage et la couverture.

Pour le raccordement aux puits, on pourra par exemple faire remonter la géomembrane le long du puits et effectuer un raccordement en tête coulissant. On peut également effectuer le raccordement avec une géomembrane très souple (type EPDM ou PEBD) en laissant des plis d'aisance le long du puits. On peut aussi souder la géomembrane à une plaque PEHD plus ou moins rigide posée au sol autour du puits. On peut enfin envisager une tête de puits coulissant sur le drain vertical et raccordée à l'étanchéité de la couverture (voir Figure 13).

Dans le cas des couvertures minérales, on s'assurera également de la bonne continuité de la couche d'étanchéité au droit des points singuliers. Compte tenu des difficultés de mise en œuvre des matériaux minéraux sur ces points, des solutions alternatives faisant intervenir des matériaux synthétiques (géomembrane) peuvent être mises en œuvre (voir Figure 13).



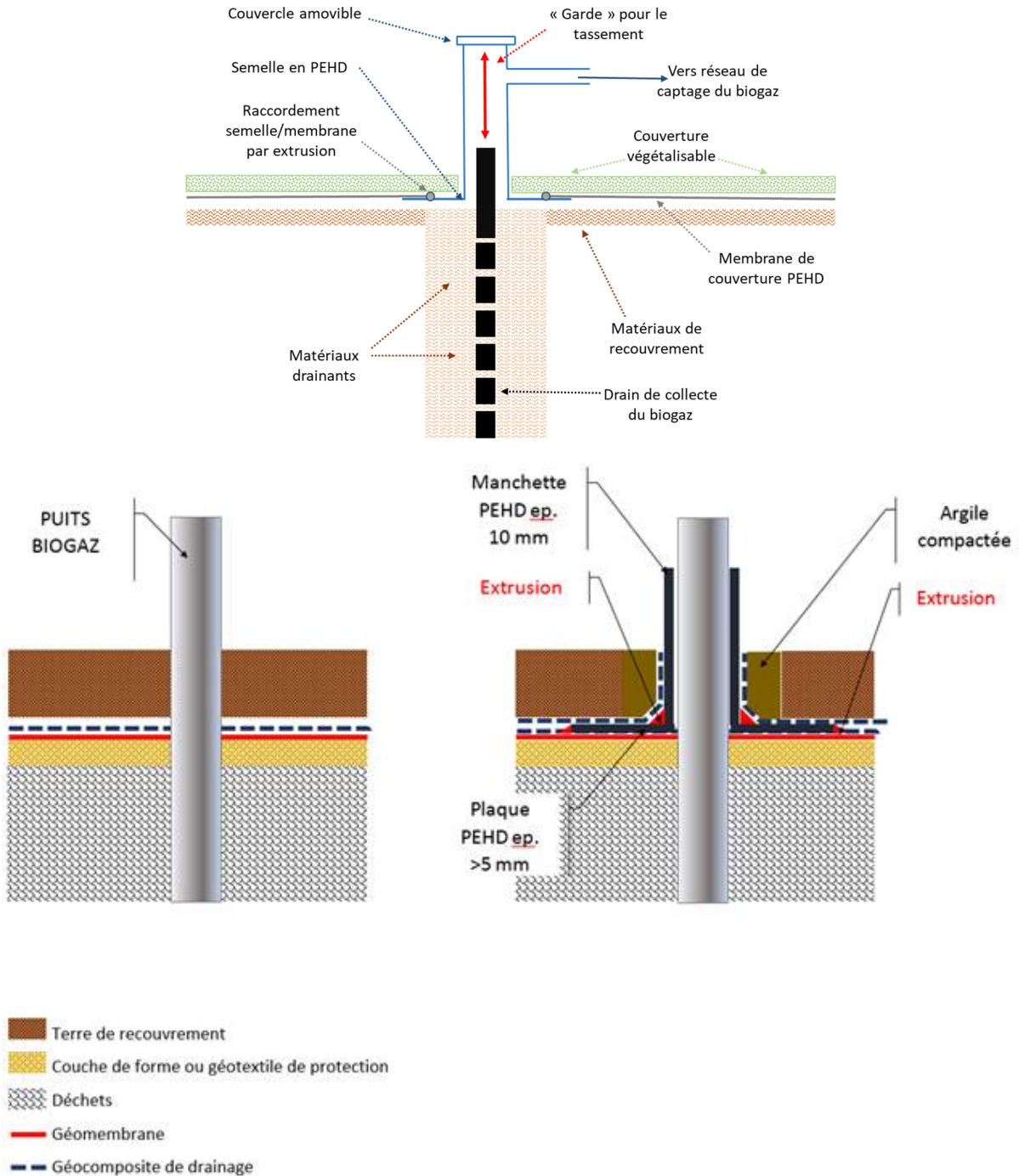


Figure 13 : Exemples de traitement de traversée de couverture par un puits.

Les supports de réseau aérien peuvent être des piquets, si la structure de couverture le permet. Dans le cas contraire, on pourra disposer le réseau sur des merlons, des plots bétons ou toute solution préservant l'intégrité de la couverture.

D'autres points fixes peuvent interagir avec la couverture : pistes et voiries, points d'instrumentation ou armoires électriques, etc. Dans tous les cas, on veillera aux mêmes principes : conserver l'étanchéité au raccordement et permettre une absorption des tassements.

11.2. INTERACTIONS AVEC LE RÉSEAU DE DRAINAGE DES EAUX SUPERFICIELLES

Les interactions principales entre le réseau de gestion des eaux et la couverture se situent au niveau des fossés et des descentes en talus.

Dans tous les cas, qu'il soit étanché ou non par géomembrane, le réaménagement devra prévoir des fossés dimensionnés pour collecter la totalité de l'eau de pluie. Les fossés reçoivent en effet l'eau ruisselée et l'eau collectée par la couche de drainage. Une attention particulière sera d'ailleurs portée sur la connexion entre la couche de drainage et le fossé afin que l'eau drainée soit déversée en totalité dans le fossé, sans risque de passer sous celui-ci.

Un fossé situé en crête de talus ou à la cassure d'une pente peut s'avérer nécessaire pour limiter l'érosion des matériaux de couverture. Ces fossés doivent être étanchés : continuité de la géomembrane de couverture ou géomembrane dédiée, ou tout autre dispositif, et doivent présenter des pentes d'au-moins 0,5 % après tassements.

Pour les grandes surfaces de dômes, il peut être nécessaire de prévoir des fossés intermédiaires supplémentaires afin d'assurer la collecte de l'ensemble des eaux.

L'usage du béton est limité de préférence à la réalisation des fossés de pied de talus ou de crête de digues périphériques. De même pour les descentes d'eau connectant le fossé de crête au fossé de pied de talus, les matériaux souples sont à privilégier.

On veille à entretenir très régulièrement le réseau de collecte et gestion des eaux pour le maintenir opérationnel, surtout dans l'année qui suit la réalisation de travaux de couverture. En effet, avant la reprise de la végétation, les fines du matériau de couverture peuvent être entraînées par les eaux de ruissellement dans les réseaux et pourraient le colmater rapidement.

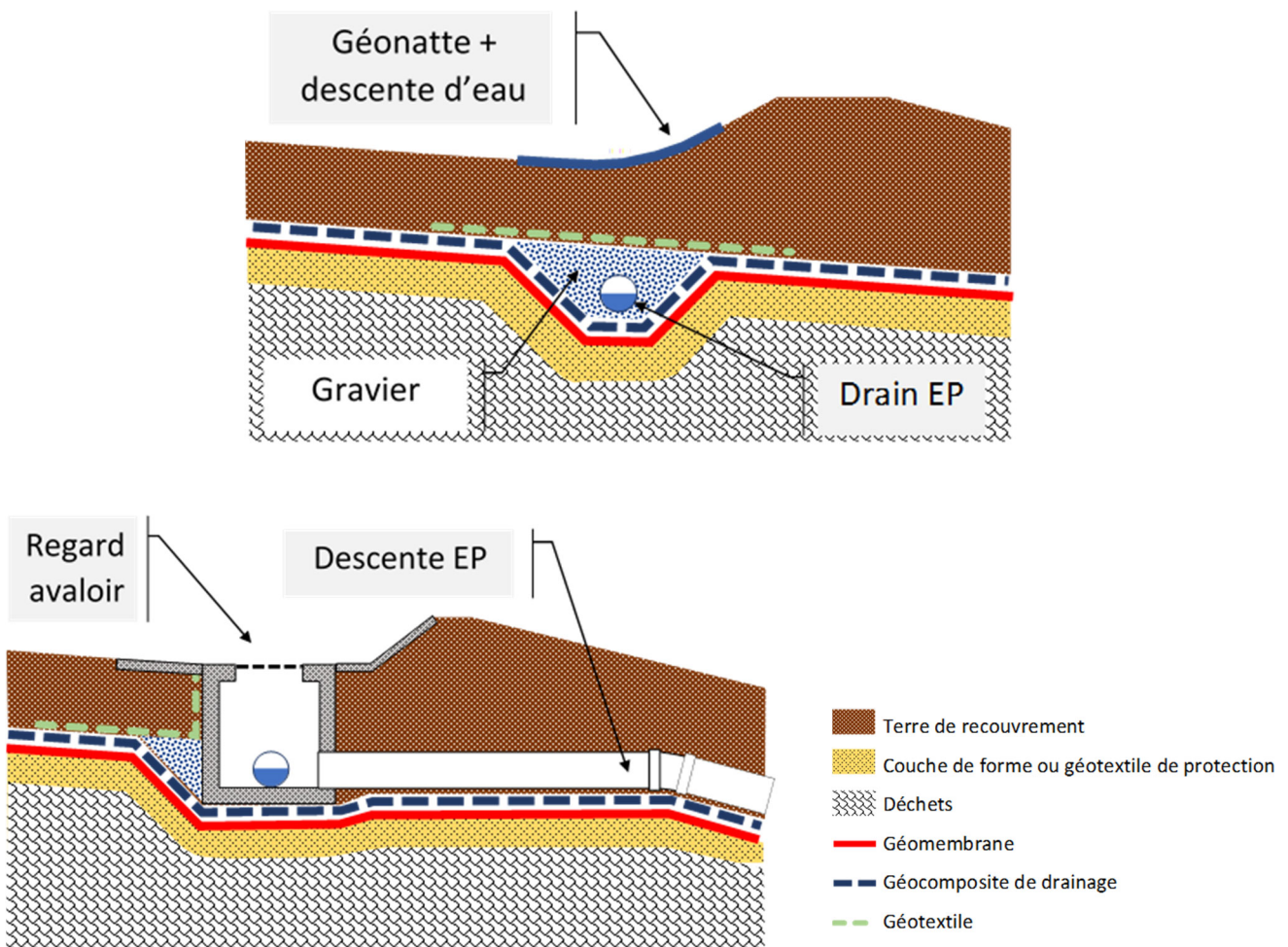


Figure 14 : Exemples de traitement de fossés en crête de talus
(en haut : zone courante, en bas : exutoire)

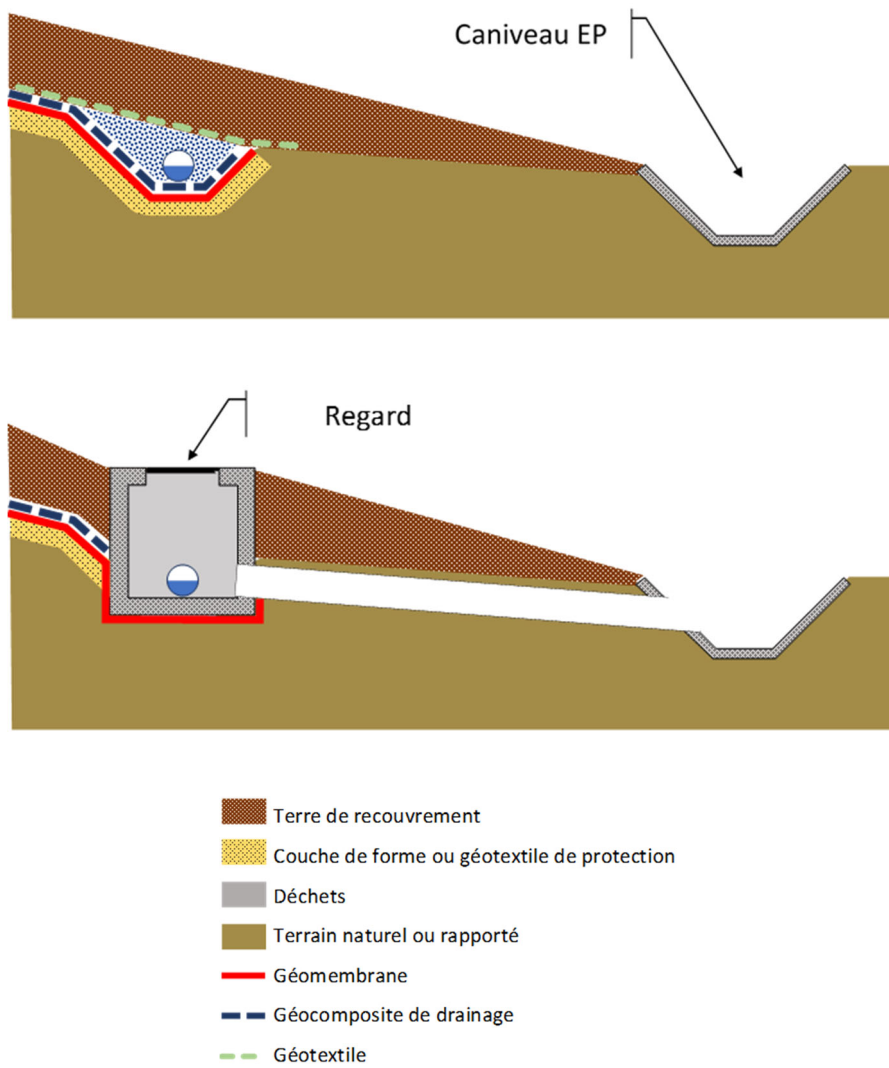


Figure 15 : Exemples de traitement de fossés en pied de talus (en haut : zone courante, en bas : exutoire).

12. Suivi et contrôles

Comme tout ouvrage de génie civil, la couverture d'une ISD doit faire l'objet d'un suivi régulier afin de s'assurer de son intégrité et de son bon fonctionnement. La teneur précise de ce suivi est fonction du type d'ISD, de la nature des déchets en place et de leur éventuel état de maturation ainsi que de l'usage du site (voir chapitre 13).

Les paragraphes suivants abordent certains points principaux du suivi d'une couverture d'ISD après sa mise en service.

12.1. SUIVI DES DÉFORMATIONS DE LA COUVERTURE

12.1.1. Tassements

Les déformations de la couverture sous l'action des tassements du massif de déchets ont une influence potentielle directe sur la fonctionnalité des couches qui la constitue. Le suivi topographique annuel du massif de déchets est une obligation réglementaire à laquelle doivent souscrire les exploitants d'ISD (excepté ISDI), qui permet notamment d'évaluer l'amplitude et la répartition de ces déformations.

Dans le cas précis des couvertures, 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 ;
- s'assurer que les déformations mesurées ne remettent pas en cause l'intégrité et la fonctionnalité des dispositifs d'étanchéité et de drainage.

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.

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

- une ou plusieurs bases fixes rattachées au NGF5 servant de référence à la topographie du site ;
- un relevé initial à l'issue de la phase de travaux de couverture ;
- puis des relevés réguliers avec le même maillage (x, y) pour évaluer les déformations du massif.

Réglementairement, le suivi topographique est réalisé *a minima* une fois par an (hors ISDI). Des campagnes supplémentaires peuvent être réalisées si des désordres sont observés ou si des événements climatiques exceptionnels ont abouti à un constat visuel d'altération de la couverture.

⁵ Nivellement général de la France

Techniques	Principes	Applicables 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 de couverture Suivi long terme	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 de couverture Suivi long terme	Précision Coût	Traitement des données Nombre de points limité
Scanner et radar laser 3D	Basé sur le temps de parcours d'un laser.	Travaux de couverture Suivi long terme	Précision Densité des points de mesure Rapidité	Encore peu répandue Coût Traitement des données
Photogrammétrie aéroportée	Une série de clichés photographiques géoréférencés permettent de reconstituer la géométrie du site	Travaux de couverture Suivi long terme	Rapidité Grande surface couverte Précision Répétabilité	Compétences d'acquisition et de traitement des données

Tableau 11 : Synthèse des méthodes de suivi en grand de l'évolution géométrique du massif de déchets.

12.1.2. Instabilités locales

Un suivi visuel régulier, réalisé à la faveur des visites de contrôle et d'entretien du site, peut permettre d'identifier d'éventuelles amorces d'instabilité au droit des zones à risque de la couverture (zone courante de talus, crête). Il peut également être pertinent de compléter le relevé topographique par le suivi d'alignement de points, notamment dans le cas de zones susceptibles de faire l'objet de glissements ou sur un glissement avéré. Les points de suivi peuvent être matérialisés par des piquets, des bornes ou des plots en ciments coulés sur la couverture.

12.2. INTÉGRITÉ DE LA COUCHE D'ÉTANCHÉITÉ

Une altération de la couche d'étanchéité peut particulièrement se traduire par une augmentation des volumes d'eau infiltrés dans le massif de déchets, avec comme indices observables :

- une augmentation des hauteurs de lixiviats dans les puits de lixiviats ;
- une augmentation des débits de lixiviats en cas de drainage gravitaire ;
- une augmentation de la production de biogaz ;
- l'apparition ou l'augmentation d'émissions diffuses de biogaz au travers de la couverture.

Pour ce qui concerne la hauteur et la production de lixiviats, on sera particulièrement attentif au délai et à l'amplitude de la variation de hauteur/débit après un évènement pluvieux : des délais raccourcis et des amplitudes augmentées doivent attirer l'attention sur une potentielle défaillance du dispositif d'étanchéité/drainage.

La production de biogaz peut être mesurée via le dispositif de captage et d'élimination. Pour ce qui concerne les émissions diffuses, des indices peuvent être identifiées au niveau de la couche de végétalisation : stress de la végétation, modification de la teneur en eau, fissures. Une cartographie ponctuelle (en cas de doute) ou régulière des émissions diffuses peut être réalisée en suivant les prescriptions du Fascicule de Documentation AFNOR FD X43-191, relatif à la caractérisation et la cartographie des émissions diffuses de biogaz au travers des couvertures d'ISD.

12.3. CONTRÔLE DE LA CAPACITÉ DE DRAINAGE DES EAUX MÉTÉORIQUES

12.3.1. Couche de drainage

Un contrôle visuel régulier de la couverture doit être réalisé, à la recherche d'indices d'éventuelle défaillance de la couche de drainage des eaux superficielles. Parmi ces indices, on peut citer (liste non exhaustive) :

- loupes de glissement ou fissures de la couche de végétalisation en talus ;
- affaissements localisés de la couche de végétalisation en zone sommitale ;
- teneur en eau anormalement élevée (sursaturation) de la couche de végétalisation ;
- modifications locales de la couverture végétale.

12.3.2. Fossés et cunettes

À l'issue d'épisode pluvieux exceptionnels, de longues périodes de pluies ou d'évènements pluvieux après des périodes sèches, un contrôle visuel, des cunettes et fossés de drainage des eaux superficielles, doit être réalisé. On recherchera des zones d'accumulation de matériaux, d'éventuelles inversions de pentes, des zones de stagnation ou d'infiltration d'eau.

12.4. QUALITÉ ET ÉVOLUTION DU COUVERT VÉGÉTAL

Pendant la phase de suivi long terme de l'ISD, un suivi visuel régulier permettra de s'assurer de l'évolution du couvert végétal, en termes de densité et de qualité (variétés présentes). Les indices et causes éventuels de stress de la végétation seront recherchés (fuite de biogaz notamment).

Les espèces arbustives et/ou à enracinement potentiellement profond devront être supprimées. Dans cette optique, un fauchage ou une tonte semestriels du couvert végétal sont recommandés, en fin de printemps et fin d'automne. Cette action permet également de renforcer et de densifier le couvert d'espèces herbacées.

La mise en pâture d'animaux peut également être envisagée pour l'entretien du couvert végétal, à condition d'assurer une bonne gestion : rotation régulière des zones pâturées, protection des équipements, adaptation des espèces, ...

13. Usages futurs

Réglementairement, l'exploitant d'une ISDD ou ISDND doit déposer un dossier de Servitude d'Utilité Publique décrivant les restrictions d'usage futur du sol compatible avec le PLU.

Cette contrainte n'existe pas pour les ISDI. *A priori*, compte tenu de la nature des déchets en présence, tout usage peut être envisagé sous réserve de compatibilité au PLU et d'aptitude géotechnique.

Le Tableau 12 décrit quelques usages envisageables au droit des zones sommitales des zones de stockage d'une ancienne ISDD ou ISDND. Cette liste n'est pas limitative. Quelle que soit l'activité envisagée, certains principes de préservation de l'intégrité des fonctions de la couverture doivent être appliqués :

- pas de fondations, intrusions ou autres structures dépassant la profondeur de la couche arable ;
- pas de modification du profil en déblais. Les conséquences d'un apport éventuel de matériaux devront être évaluées d'un point de vue géomécanique et hydraulique ;
- pas de bassins creusés ;
- pas de surcharge des talus sans analyse géotechnique préalable.

Usage	Type d'ISD adapté	Précautions vis-à-vis la couverture
Sans usage	ISDND	Aucune
Pâturage	ISDND, ISDD	Aucune
Cultures	ISDND, ISDD	Espèces à enracinement superficiel, labours peu profonds, structures légères posées et non ancrées.
Agroforesterie	ISDND, ISDD	Adapter la sélection d'essences à l'épaisseur de la couche arable.
Espace paysager	ISDND, ISDD	Adapter la sélection d'essences à l'épaisseur de la couche arable .
Aire de loisirs	ISDND, ISDD	Pas de plan d'eau creusé. Structures légères posées et non ancrées.
Ferme solaire	ISDND, ISDD	Travaux en période estivale. Pistes de chantier à créer puis démanteler. Structures posées.
Activité industrielle et commerciale	ISDND, ISDD	Pas de fondations profondes. Privilégier des plates-formes en rehausse.

Tableau 12 : Exemples d'usages potentiels au droit d'ISD après exploitation des casiers.

14. Références citées

- ADEME** (2001) - Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés. ADEME, Angers.
- ADEME** (2005) - Guide méthodologique pour le suivi des tassements des Centres de Stockage de classe II.
- AFNOR** (2018) - NF EN Iso 17892-4. Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrie des particules.
- AFNOR** (2017) - Fascicule de Documentation AFNOR FD P11-302 « Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté ».
- AFNOR** (2017) - Fascicule de Documentation AFNOR FD X30-438. Installations de stockage de déchets - Guide de bonnes pratiques pour les caractérisations géologiques, hydrogéologiques et géotechniques.
- AFNOR** (2017) - NF G38-067 Géosynthétiques, géotextiles et produits apparentés - Stabilisation d'une couche mince sur pente - Justification du dimensionnement et éléments de conception.
- AFNOR** (2015) - NF EN 933-8+A. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable.
- AFNOR** (2015) - NF EN ISO 10318. Géosynthétiques. Partie 1 : termes et définitions.
- AFNOR** (2013) - NF P84-500. Dictionnaire des termes relatifs aux géomembranes.
- AFNOR** (2004) - Géosynthétiques. Méthodes d'essai pour la détermination de la masse surfacique des géosynthétiques bentonitiques. AFNOR NF EN 14196.
- BRGM** (2008) - TRISOLIX - Résistance du TRISOPLAST® à l'agression cationique. Rapport Final. BRGM/RP-56898-FR.
- BRGM** (2005) - Recommandations pour la caractérisation de la perméabilité des barrières d'étanchéité des installations de stockage de déchets. Rapport BRGM-RP-53721-FR.
- BRGM** (1997a) - Mise en œuvre de matériaux rapportés destinés au confinement des centres de stockage. Guide Technique. Document BRGM 271. BRGM, Orléans.
- BRGM** (1997b) - Conception d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au droit d'un centre de stockage de déchets, ultimes ou non. Guide méthodologique. Documents du BRGM 273.
- Carsel, R., Parrish, R.** (1988) - Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24(5), 755-769.
- CFG** (2017) - Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes, CFG, Fascicule n° 10.
- CFG** (1995) - Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets, Fascicule n° 11.
- CFG** (1998) - Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques. Comité Français des Géosynthétiques, Fascicule n° 12.
- CFG** (2011) - Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en Installations de Stockage de Déchets, Fascicule n° 13.
- Edil, T.** (2003) - A review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners. *Waste Management* 23(7): 561-571.
- Environnement & Technique** (2006) - Confinement des déchets : les apports de la géochimie pour la compréhension des barrières argileuses. *Environnement & Technique*, Mai 2006 No. 256, pp. 29-33.

- Environnement & Technique** (2004) - Fond de sites de stockage de déchets. L'équivalence en étanchéité ? Environnement & Technique, Mai 2004 No. 236, pp. 31-34.
- EPA** (1991) - Design and construction of RCRA/CERCLA final covers. EPA/625/4-91/025, Cincinnati, OH.
- Geo. Int.** (2005) - Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to large circular defects in the geomembrane. Geosynthetics International, 12(4), 205-207.
- JCH** (2001) - On the hydro-dispersive equivalence of multi-layered mineral barriers. Journal of Contaminant Hydrology, n° 51, pp.215-231.
- JNGG** (2008) - Étude comparative des performances hydrauliques d'adjuvants argileux en traitement de sols. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG'08, Nantes, 18-20 juin 2008.
- JOCE** (1999) - Directive du Conseil de l'Union Européenne no. 1999/31/CE concernant la mise en décharge des déchets. Journal Officiel du Conseil Européen du 16 juillet 1999.
- LCPC-SETRA** (1992) - Guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme ». Fascicule I : principes généraux, Fascicule II : Annexes techniques.
- Li, Y.-H., Gregory, S.** (1974) - Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 38, 703-714.
- LIXAR2** (2008) - Projet LIXAR2 - Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques. Rapport de synthèse. BRGM/RP-56357-FR.
- LIXAR** (2005) - Geosynthetic clay liner interaction with leachate: correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 131(6), 740-749.
- SARDINIA** (2007a) - French approach to equivalence in landfill geological barriers. Dans : Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium (R. Cossu & R. Stegmann Eds.), S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).
- SARDINIA** (2007b) - Rapid method for estimating the low permeability of a high bentonite content soil mixture. Dans: Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium (R. Cossu & R. Stegmann Eds.), S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).
- SARDINIA** (2003): Assessing the quantity of leachate: a simple tool for short and long term prediction and its evaluation on real size landfill sites (T. Gisbert, C. Bloquet, G. Barina and C. Petitpas) Sardinia 2003, 9th International Landfill Symposium, Santa Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- SETRA-LCPC** (1992) - Réalisation des remblais et des couches de forme.
- SETRA** (2011) - Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Évaluation environnementale.
- Talbot** (1979) - The accurate numerical integration of Laplace Transforms. J. Inst. Math. Its Appl. 23, 97-120.
- Van Genuchten, T.** (1980) - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.



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