



**HAL**  
open science

## Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets

Nathalie Touze, V. Norotte, Camille Barral, J. Bruhier, M. Deburaux, X. Delphin, G. Didier, T. Gisbert, A. Guillon, D. Guyonnet, et al.

### ► To cite this version:

Nathalie Touze, V. Norotte, Camille Barral, J. Bruhier, M. Deburaux, et al.. Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets. pp.85, 2011. hal-02595036

**HAL Id: hal-02595036**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02595036v1>**

Submitted on 15 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets

Mai 2011



## Sommaire du fascicule

Liste des figures .....	3
Liste des tableaux .....	5
1 GENERALITES .....	6
1.1 AVANT-PROPOS .....	6
1.2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE .....	6
1.2.1 La notion de barrière multiple en confinement des déchets .....	6
1.2.2 Concepts de stockage .....	7
1.2.3 Les différents types de couvertures en installations de stockage de déchets .....	9
1.2.4 Notion d'équivalence .....	9
1.3 LES DIFFERENTS INTERVENANTS .....	10
1.4 ORGANISATION DU FASCICULE .....	10
2 LES GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES ET LE DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES..	11
2.1 DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES (DEG) .....	11
2.2 Structure support .....	12
2.2.1 Fonctions .....	12
2.2.2 Matériaux .....	12
2.2.3 Dispositif de drainage .....	12
2.3 GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES .....	13
2.3.1 Matériaux constitutifs des GSB .....	13
2.3.2 Différents types de géosynthétiques bentonitiques .....	14
2.4 STRUCTURE DE CONFINEMENT ET DE PROTECTION .....	16
2.4.1 En fond .....	16
2.4.2 Sur les flancs .....	16
2.4.3 En couverture .....	16
3 CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DU DISPOSITIF D'ETANCHEITE comportant un GEOSYNTHETIQUE BENTONITIQUE .....	18
3.1 GENERALITES .....	18
3.2 CONCEPTION .....	18
3.2.1 Paramètres à prendre en compte .....	19

3.2.2	Caractéristiques des géosynthétiques bentonitiques.....	24
3.2.3	Critères de choix des géosynthétiques bentonitiques .....	27
3.2.4	Essais .....	28
3.3	MISE EN OEUVRE .....	29
3.3.1	Structure support.....	30
3.3.2	Structure d'étanchéité.....	31
3.3.3	Structure de confinement et de protection.....	45
3.3.4	Hydratation des GSB.....	46
3.4	Dispositions relatives aux arrêts et reprises du chantier .....	47
4	CONTROLES.....	48
4.1	DOMAINE DES CONTROLES.....	48
4.2	RECOMMANDATIONS GENERALES RELATIVES AUX CONTROLES D'UN DEG .....	51
4.2.1	Contrôles de l'organisation du chantier .....	52
4.2.2	Contrôles des zones de stockage et de manutention des produits.....	52
4.2.3	Contrôles de réception des matériaux et matériels sur le chantier.....	52
4.2.4	Planches d'essais .....	53
4.2.5	Contrôles associés à la mise en œuvre et réception de la structure support .....	53
4.2.6	Contrôles du plan de pose (ou de calepinage) des géosynthétiques bentonitiques.....	54
4.2.7	Contrôles associés à la mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques.....	54
4.2.8	Contrôles associés à la mise en œuvre de la structure de protection et de confinement .....	54
4.2.9	Contrôles du plan de récolement.....	55
4.3	FREQUENCE DES CONTROLES DE RECEPTION DES CARACTERISTIQUES DES GSB .....	55
5	CONTENU DU PLAN D'ASSURANCE QUALITE (PAQ).....	57
5.1	CONTENU DU SCHEMA DIRECTEUR DE LA QUALITE (SDQ) .....	58
5.2	DOCUMENTS D'ASSURANCE QUALITE .....	58
	ANNEXES .....	61

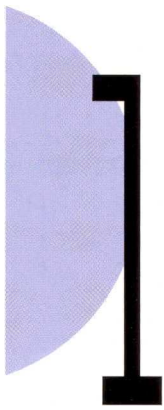
## Liste des figures

Figure 1 – Visualisation des différents composants des barrières actives et passives, de gauche à droite : matériau granulaire drainant, géotextile antipoinçonnant, géomembrane, étanchéité passive .....	7
Figure 2 – Principe d'un site de stockage à atténuation naturelle des flux (Site de classe 3) .....	8
Figure 3 – Principe d'un site de stockage à gestion active des flux (Site de classe 2) .....	8
Figure 4 – Principe d'un site de stockage à stabilisation des flux (Site de Classe 1) .....	9
Figure 5 – Illustration de l'utilisation d'un GSB en couverture .....	9
Figure 6 – Illustration de la structure support, la structure d'étanchéité (GSB) et la structure de confinement .....	11
Figure 7 – Illustration d'arrivées d'eau latérales sur talus intérieur .....	13
Figure 8 – Schéma d'un géotextile bentonitique collé .....	15
Figure 9 – Schéma d'un géotextile bentonitique aiguilleté .....	15
Figure 10 – Schéma d'un géotextile bentonitique cousu .....	15
Figure 11 – Schéma d'un géotextile bentonitique thermolié .....	15
Figure 12 – Schéma d'un géofilm bentonitique .....	16
Figure 13 – Bentonites hydratées calcique et sodique (Modifié d'après Guyonnet et al. (2005)) .....	22
Figure 14 – Photographie illustrant l'écartement entre lés après que la géomembrane ait été retirée (d'après Thiel et Richardson, 2005) .....	23
Figure 16 – Illustration d'un mauvais et d'un bon état de surface sur pente (d'après Touze-Foltz et al. (2008)) .....	30
Figure 17 – Visualisation d'une protection complémentaire possible des rouleaux correctement emballés, stockés et étiquetés .....	32
Figure 18 – photographie montrant les rouleaux de GSB emballés; étiquetés et correctement stockés .....	32
Figure 19 – Déchargement des rouleaux avec du matériel adapté .....	34
Figure 20 – Illustration du déroulage et du contrôle de la largeur de recouvrement .....	34
Figure 21 – Illustration du déroulage de haut en bas sur talus .....	35
Figure 22 – Illustration sur talus de la pose selon la ligne de plus grande pente .....	35
Figure 23 – 2 points triples .....	37
Figure 24 – Point multiple .....	37
Figure 25 – Recouvrement avec apport de bentonite .....	38
Figure 26 – Apport de bentonite (a) en pâte et (b) en poudre .....	38
Figure 27 – Schéma de principe d'un ancrage en tête par enfouissement dans une tranchée (exemple) .....	39
Figure 28 – Schéma de principe d'un ancrage en tête par simple lestage .....	40
Figure 29 – Schéma de principe d'un ancrage intermédiaire en tranchée avec joint .....	40

Figure 30 – Schéma de principe d'un ancrage intermédiaire par lestage avec joint .....	41
Figure 31 – Schéma de principe d'un raccord horizontal en pied de talus .....	41
Figure 32 – Illustration de l'utilisation d'un réglet métallique .....	42
Figure 33 – Schéma de principe d'un recouvrement autour d'une traverse d'étanchéité .....	43
Figure 34 – Vue en coupe de la jonction à une traversée d'étanchéité .....	43
Figure 35 – Illustrations de recouvrements autour de traversées d'étanchéité .....	43
Figure 36 – Illustration de la mise en place de noyau d'argile en partie supérieure d'étanchéité autour d'une cheminée	44
Figure 37 – Schéma de principe de raccordement à un fossé (exemple) .....	44
Figure 38 – Schéma de principe d'une réparation .....	45
Figure 39 – Déplacement des engins sur une surface préalablement confinée et protégée .....	46

## Liste des tableaux

- Tableau 1 – Place des GSB dans les barrières en fond d'ISD 7
- Tableau 2 – Caractéristiques fonctionnelles à considérer pour la fonction étanchéité 26
- Tableau 3 – Caractéristiques de mise en œuvre à considérer pour la fonction étanchéité 27
- Tableau 4 – Caractéristiques de durabilité à considérer pour la fonction étanchéité 27
- Tableau 5 – Importance de l'examen des principales caractéristiques des GSB 28
- Tableau 6 – Structure support 49
- Tableau 7 – Structure d'étanchéité 50
- Tableau 8 – Structure de confinement et de protection 51
- Tableau 9 – Caractéristiques à contrôler et fréquences de contrôle pour la fonction étanchéité 56
- Tableau 10 – Documents d'assurance qualité 59



# 1 GENERALITES

## 1.1 AVANT-PROPOS

L'objet de ce fascicule est de fournir des informations relatives à l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques (GSB) dans les Installations de stockage de déchets (ISD) ainsi que des recommandations pour leur utilisation et leur mise en œuvre.

Le choix retenu par les rédacteurs est d'identifier les éléments techniques utiles à l'emploi des géosynthétiques bentonitiques, même si la détermination de certaines de leurs caractéristiques n'est pas encore normalisée.

Par géosynthétiques bentonitiques, on entend tous produits manufacturés en forme de nappe constitué d'un assemblage de matériaux comportant au moins de la bentonite, en poudre ou granulés, assurant la fonction étanchéité et de un ou plusieurs géosynthétiques utilisés comme support ou conteneur, utilisés dans le domaine de la géotechnique et du génie civil, assurant la fonction étanchéité (AFNOR, 2008).

Les abréviations utilisées dans ce fascicule sont précisées en annexe A.

Les géosynthétiques bentonitiques peuvent être utilisés à de nombreux endroits dans les installations de stockage de déchets. L'utilisation la plus fréquente est sans doute en fond, flanc (sous la géomembrane, en étanchéité combinée) ou couverture des casiers d'ISD. Les GSB peuvent également être utilisés en complément d'une géomembrane dans les bassins de stockage de lixiviats.

## 1.2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE

### 1.2.1 La notion de barrière multiple en confinement des déchets

Pour ce qui concerne les barrières en fonds ou flancs de casiers, les réglementations française (JORF, 1997) et européenne (JOCE, 1999) introduisent la notion de barrière multiple : à la base du massif de déchets doit être installée une barrière de sécurité dite "active", qui assure le drainage et la collecte des lixiviats et cette barrière active surmonte une barrière de sécurité dite "passive" qui est constituée, soit, par l'environnement géologique naturel du site (Article 10 du JORF 1997), ou alors par des matériaux dits "rapportés" si cet environnement naturel ne satisfait pas aux exigences réglementaires en termes d'épaisseur et de faible perméabilité (voir figure 1). Le tableau 1 synthétise les principales fonctions que doivent remplir ces barrières, ainsi que les différents matériaux qui peuvent être envisagés pour remplir ces fonctions et parmi lesquels on trouve les GSB.



	Fonctions	Matériaux
Barrière dite "active"	Drainage	Granulaires, synthétiques
	Etanchéité active	Géomembrane
Barrière dite "passive"	Etanchéité passive	Argiles naturelles, sols traités, GSB
	Atténuation naturelle	Milieu géologique naturel

Tableau 1 – Place des GSB dans les barrières en fond d'ISD



Figure 1 – Visualisation des différents composants des barrières actives et passives, de gauche à droite : matériau granulaire drainant, géotextile antipoinçonnant, géomembrane, étanchéité passive

### 1.2.2 Concepts de stockage

Les réglementations française et européenne définissent trois concepts de stockage qui sont fonction de la nature des déchets enfouis : le stockage des déchets dangereux, le stockage des déchets non dangereux et le stockage de déchets inertes, préalablement dénommés classe 1, classe 2 et classe 3, terminologie qui est reprise dans la suite du document.

Le stockage des déchets dans les sites de "classe 3" (JORF 2006) est basé sur un concept d'atténuation naturelle des flux (figure 2). Les déchets sont stockés sans barrières imperméables en couverture, flancs ou fond, mais les flux massiques qui résultent de la lixiviation des déchets par les eaux météoriques ne doivent pas avoir de conséquences sur la qualité des eaux souterraines en raison du caractère inerte des déchets. Dans ce type de stockage, le potentiel d'utilisation des GSB est limité.

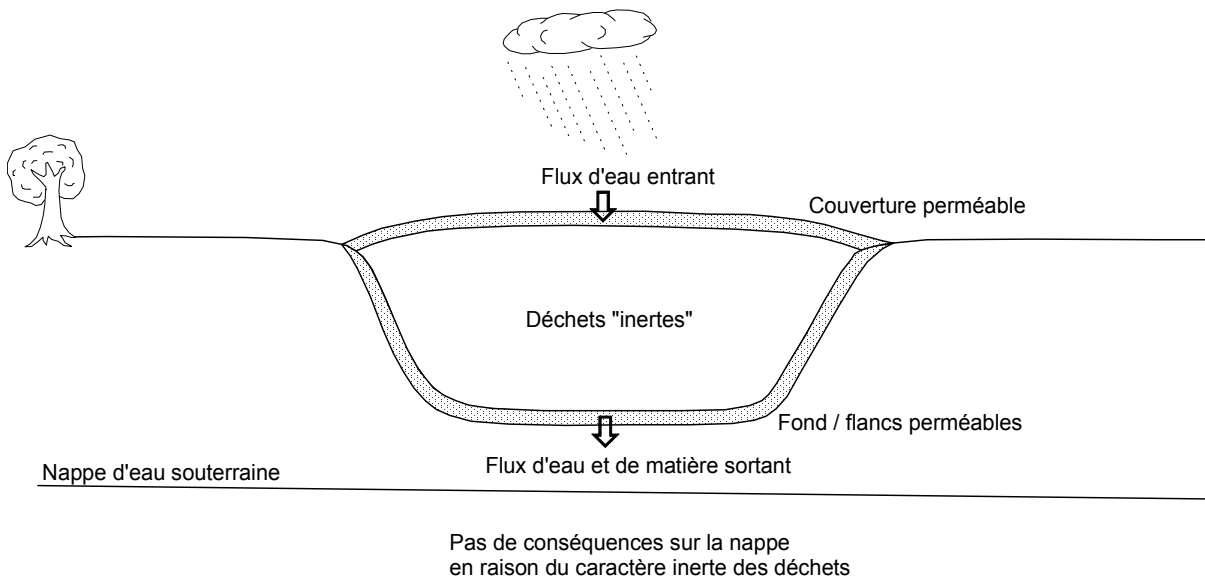


Figure 2 – Principe d'un site de stockage à atténuation naturelle des flux (Site de classe 3)

Le stockage des déchets dans les sites de "classe 2" (JORF 1997) est basé sur un concept de gestion active des flux (Figure 3). Un système d'étanchéité-drainage en fond de casier de stockage permet la collecte des lixiviats en vue de leur traitement. La couverture peut être de type semi-perméable, pour que de l'eau nécessaire à l'activité bactérienne puisse atteindre les déchets, ou imperméable avec le cas échéant une recirculation de fluides au sein des déchets (bioréacteur). Dans un tel type de stockage, les GSB peuvent être utilisés soit en fonds/flancs, soit en couverture. A noter qu'en raison de la difficulté de compacter de l'argile sur des flancs raides, les GSB sont très souvent utilisés en flancs.

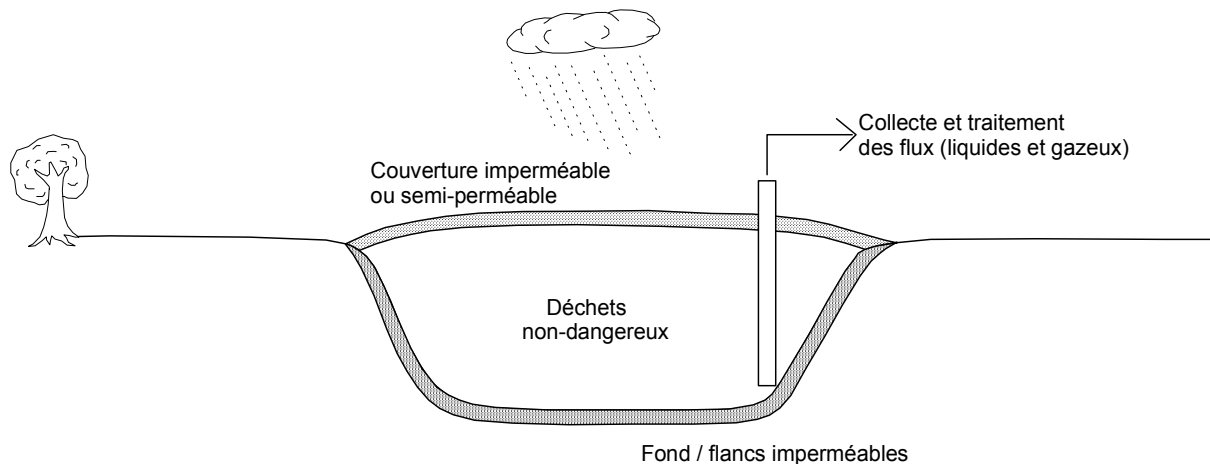


Figure 3 – Principe d'un site de stockage à gestion active des flux (Site de classe 2)

Le stockage des déchets dans les sites de "classe 1" (JORF 2003) est basé sur un concept de stabilisation des flux. Le cas échéant, les déchets stabilisés par mélange avec des liants hydrauliques sont stockés dans des casiers équipés de barrières imperméables en fonds/flancs et en couverture. Les GSB y trouvent également des applications (voir figure 4).

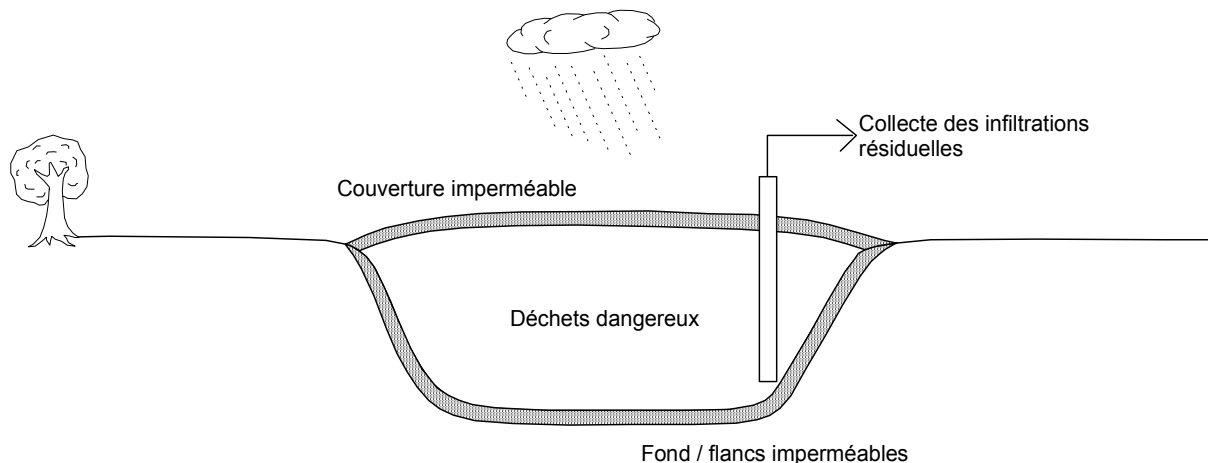


Figure 4 – Principe d'un site de stockage à stabilisation des flux (Site de Classe 1)

### 1.2.3 Les différents types de couvertures en installations de stockage de déchets

Pour ce qui concerne les couvertures (voir figure 5), on distinguera dans ce contexte les couvertures intermédiaires, provisoires et finales.

Selon l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié, la couverture intermédiaire sert notamment à limiter les infiltrations dans le massif de déchets, par exemple dans le cas d'alvéoles superposées ou d'une phase d'attente avant reprise d'exploitation.

Selon ce même arrêté, la couverture provisoire est utilisée notamment dans le cas de déchets biodégradables dans l'attente de la mise en place du réseau de drainage du biogaz. Une fois ce réseau réalisé, une couverture finale est mise en place.

Pour ce qui concerne la couverture finale, si la réglementation en vigueur fixe un objectif général de limitation des infiltrations dans le massif de déchets, les réglementations française et européenne n'imposent pas d'objectifs de moyens en termes de perméabilité ou d'épaisseur des matériaux. Le guide ADEME-BRGM de 2001 distingue les couvertures semi-perméables (coefficients de perméabilité situés entre  $10^{-8}$  et  $10^{-6}$  m/s environ) et imperméables.



Figure 5 – Illustration de l'utilisation d'un GSB en couverture

### 1.2.4 Notion d'équivalence

L'utilisation des GSB en barrière passive d'ISD fait souvent appel à la notion dite "d'équivalence". Cette notion, introduite par la réglementation (JORF, 1997), propose que lorsque le terrain naturel en l'état ne répond pas en termes de perméabilité et d'épaisseur aux exigences réglementaires, des mesures compensatoires puissent être proposées par l'exploitant pour assurer un niveau de protection équivalent. Le texte réglementaire ne précise pas en revanche, ce qui est entendu par équivalent et c'est pourquoi le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) a constitué en 2002 un groupe de travail afin d'élaborer un guide de recommandations et définir quelques règles de bonnes pratiques (MEDD, 2002) pour l'application de la notion d'équivalence. L'ADEME, le BRGM, le Cemagref, le CETE de Lyon, l'INERIS et l'INSA-Lyon ont participé à ce groupe de travail. Ce guide de bonnes pratiques, disponible au MEEDDM, a fait l'objet d'une réactualisation en 2009.

### 1.3 LES DIFFERENTS INTERVENANTS

Les différents intervenants dans les ISD sont :

- le maître d'ouvrage (collectivité, exploitant, industriel...) qui définit les exigences de l'ouvrage, choisit un bureau d'études pour la conception puis un maître d'œuvre pour les travaux et finance le contrôle qualité ; il est préférable que le maître d'œuvre qui réalise les études et la conception (APS, APD, CCTP...) assure également le suivi de la réalisation ;
- le bureau de contrôle extérieur qui établit en concertation avec le maître d'ouvrage et les entreprises le programme de contrôle et de suivi de la qualité pour le maître d'ouvrage selon la réglementation en vigueur et les règles de l'art. Il exécute le programme de contrôle extérieur et le suivi de la qualité, du respect du contrôle intérieur et vérifie à chaque étape la conformité des documents ;
- les entreprises de travaux et d'étanchéité qui établissent le PAQ relatif à l'étanchéité, réalisent les travaux et le programme de leur contrôle qualité (contrôle interne et/ou externe) de l'ouvrage ;
- un organisme tiers peut être sollicité par l'administration pour établir la conformité des travaux d'aménagement aux conditions fixées par l'arrêté d'autorisation.

### 1.4 ORGANISATION DU FASCICULE

Dans la suite de ce fascicule, les thèmes suivants sont successivement abordés :

- les géosynthétiques bentonitiques et les matériaux associés (chapitre 2) ;
- la conception et la mise en œuvre du DEG (chapitre 3) ;
- les contrôles (chapitre 4) ;
- l'assurance de la qualité (chapitre 5).

Ces chapitres sont complétés par les annexes suivantes :

- annexe A : abréviations ;
- annexe B : compléments sur la bentonite ;
- annexe C : liste des normes et essais relatifs aux GSB ;
- annexe D : exemples de mauvaises mises en œuvre ou conditions d'utilisation de GSB.

# 2

## 2 LES GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES ET LE DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES

### 2.1 DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES (DEG)

On ne peut considérer un géosynthétique bentonitique indépendamment des éléments avec lesquels il entre en contact et qui conditionnent la pérennité de son étanchéité au cours de la pose et en service. Ainsi s'introduit le concept de Dispositif d'Étanchéité par Géosynthétiques (DEG) comportant un GSB, reposant sur une surface stable.



Figure 6 – Illustration de la structure support, la structure d'étanchéité (GSB) et la structure de confinement

Le DEG est constitué des trois structures suivantes (voir figure 6) :

- la structure support, ensemble des éléments placés entre le fond de forme et la structure d'étanchéité : les dispositifs éventuels de drainage et filtration (eau et gaz) et la couche support ;
- la structure d'étanchéité ; dans le cadre de ce fascicule elle comporte un géosynthétique bentonitique qui peut être associé à une géomembrane (fond et flancs des ISD) ou à des matériaux naturels (argiles compactées ou sols traités) formant ainsi des étanchéités combinées ;

- la structure de confinement et/ou de protection constituée de l'ensemble des matériaux placés au-dessus de la structure d'étanchéité.

Les critères de choix des matériaux constitutifs du DEG font intervenir :

- les contraintes d'étanchéité : niveau de fuite admissible au regard des exigences de service et d'environnement ;
- les contraintes géométriques, mécaniques et hydrauliques liées au projet ;
- la compatibilité chimique des divers éléments entre eux (composants du DEG, produits stockés, supports et terrains environnants) ;
- les considérations d'ordre économique visant à minimiser le coût de l'ensemble tout en garantissant le bon fonctionnement de l'ouvrage pour la durée de service prise en compte.

## 2.2 STRUCTURE SUPPORT

### 2.2.1 Fonctions

Lors des travaux, le rôle de la structure support est de rendre possible ou de faciliter la mise en place du géosynthétique bentonitique.

Par la suite, durant l'exploitation et le fonctionnement de l'ouvrage concerné, la structure support doit répartir les efforts transmis en ne générant que des déformations susceptibles d'être subies sans dommage par le géosynthétique bentonitique et ses recouvrements.

La couche support a pour fonction de protéger la structure d'étanchéité vis-à-vis des agressions mécaniques. Les matériaux qui la constituent doivent donc être eux-mêmes non-poinçonnants. Ils ne doivent pas permettre le développement de végétaux et doivent être compatibles chimiquement avec la structure d'étanchéité. La structure support doit être stable par elle-même, à la fois lors des travaux de réalisation de l'ouvrage et en cours d'exploitation de celui-ci.

### 2.2.2 Matériaux

Si la surface de pose de la couche support est constituée de matériaux non poinçonnants en accord avec les dispositions de la conception (sable en couverture, matériaux argileux, etc.), il est possible d'y poser directement la structure d'étanchéité.

Dans le cas de risque de sous-pression un drainage complémentaire doit être mis en oeuvre.

Si la surface de pose est trop irrégulière, il est nécessaire de réaliser une couche support à partir de matériaux d'apport.

L'objectif est d'obtenir une surface de pose plane et fermée.

### 2.2.3 Dispositif de drainage

Tout liquide se trouvant sous le géosynthétique bentonitique (nappe phréatique ou arrivée d'eau ponctuelle (voir figure 7) peut nuire au bon fonctionnement de l'ouvrage notamment par les sous-pressions qu'il peut engendrer. Un dispositif de drainage des eaux doit alors être envisagé avec, le cas échéant, un dispositif de filtration pour assurer la pérennité du drain. Ce dispositif de drainage devra être justifié par les dispositions de conception.

Le géosynthétique bentonitique peut également être soumis à des sous-pressions gazeuses : déchets ou sols fermentescibles, remontées rapides de la nappe phréatique dans un sol non saturé, etc.

Pour contrer le soulèvement du géosynthétique bentonitique sous l'effet des sous-pressions des gaz piégés, il est nécessaire de prévoir un dispositif de drainage des gaz qui ne doit jamais être saturé d'eau.

Ces dispositifs de drainage sont constitués de graviers ou de sable, de drains, de géotextiles, de géospaceurs ou de géocomposites. Les structures de filtration sont réalisées en sable ou au moyen d'un géotextile adapté.



Figure 7 – Illustration d'arrivées d'eau latérales sur talus intérieur

## 2.3 GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES

### 2.3.1 Matériaux constitutifs des GSB

#### 2.3.1.1 Bentonite

La bentonite est définie comme un matériau argileux, majoritairement composé de smectites (60% au minimum) et plus particulièrement de smectite et de minéraux accessoires tels que le quartz, la calcite, le mica, le feldspath, la pyrite, la goethite.

NOTE : dans la pratique le terme smectite désigne une famille d'argiles, le terme bentonite désigne le produit industriel.

On distingue trois types principaux de bentonite :

- bentonite sodique : bentonite dont le minéral constitutif principal est une smectite sodique;;
- bentonite calcique : bentonite dont le minéral constitutif principal est une smectite calcique ;
- bentonite calcique activée (ou modifiée) : bentonite calcique modifiée chimiquement par un procédé d'échange ionique connu sous le terme d'activation, en général par ajout de 5 à 10% de carbonate de sodium ; le minéral principal est alors une smectite sodique.

Qu'elles soient naturelles, artificielles, ou activées, les bentonites font l'objet, après séchage, d'un broyage conduisant à des granulométries différentes (poudre, granulés) et adaptées à différents emplois. D'autres traitements peuvent en outre améliorer les propriétés de résistance chimique des bentonites, comme l'adjonction de polymères.

Les propriétés de gonflement des bentonites sodiques, calciques et calciques activées étant différentes leurs performances en termes de perméabilité aux fluides ne sont pas identiques.

On regroupe sous l'appellation bentonites sodiques, les bentonites sodiques naturelles et calciques activées dont le minéral constitutif principal est une smectite sodique.

L'annexe B précise cette description des bentonites.

### 2.3.1.2 Géotextiles

Un géotextile est défini par la norme NF EN ISO 10318 comme une matière textile plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique) pouvant être non tissée, tricotée ou tissée, utilisée en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Au sein des géosynthétiques bentonitiques, les géotextiles servent principalement à contenir la bentonite et à conférer une résistance à la traction.

Les principales familles de géotextiles utilisées dans la fabrication des GSB sont :

- les géotextiles tissés, produits par entrelacement, habituellement à angle droit, de deux ou de plusieurs faisceaux de fils, de filaments, de bandelettes ou d'autres éléments (norme NF EN ISO 10318) ;
- les géotextiles non-tissés faits de fibres, de filaments ou d'autres éléments orienté(e)s directionnellement ou de façon aléatoire et lié(e)s de façon mécanique et/ou thermique et/ou chimique (norme NF EN ISO 10318).

Les caractéristiques des géotextiles dépendront de la nature des fibres, fils, filaments ou bandelettes, du type de polymère utilisé, des formes des constituants et de leurs modes d'assemblage.

Les principaux polymères utilisés sont le polypropylène et le polyester.

### 2.3.1.3 Géofilms

Les géofilms sont des produits manufacturés à base de polymères, en forme de nappe ayant une épaisseur fonctionnelle inférieure à 1 mm, utilisés dans le domaine de la géotechnique et du génie civil afin de limiter les transferts entre deux milieux. Ils assurent les fonctions de séparation et d'imperméabilisation.

Le géofilm ne doit en aucun cas être assimilé à une géomembrane dont l'épaisseur fonctionnelle est supérieure à 1 mm (NF P 84-500).

## 2.3.2 Différents types de géosynthétiques bentonitiques

Les géosynthétiques bentonitiques sont composés des deux familles de produits suivantes :

- les géotextiles bentonitiques, répondant à cette définition : produit manufacturé en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comprenant au moins un géotextile et de la bentonite, utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil et assurant un rôle d'étanchéité ;
- les géofilms bentonitiques, répondant à la définition précisée au chapitre 2.3.2.6.

Conformément aux définitions données dans les normes XP P84-700 et NF EN ISO 10318, la bentonite est, dans les géosynthétiques bentonitiques, le composant qui assure l'étanchéité.

### 2.3.2.1 Géotextiles bentonitiques collés

Les géotextiles bentonitiques collés sont composés de deux géotextiles entre lesquels se trouve une couche de bentonite. L'ensemble est maintenu par une colle hydrosoluble (voir figure 8).





Figure 8 – Schéma d'un géotextile bentonitique collé

### 2.3.2.2 Géotextiles bentonitiques aiguilletés

Les géotextiles bentonitiques aiguilletés sont constitués d'un géotextile support et d'un géotextile de couverture entre lesquels est contenue une couche de bentonite par aiguilletage sur toute sa surface. L'aiguilletage est réalisé par de nombreux points de piquage au moyen d'aiguilles crochetées (voir figure 9). Lors de l'aiguilletage, les fibres d'un des géotextiles sont ancrées dans l'autre géotextile en traversant la couche de bentonite.

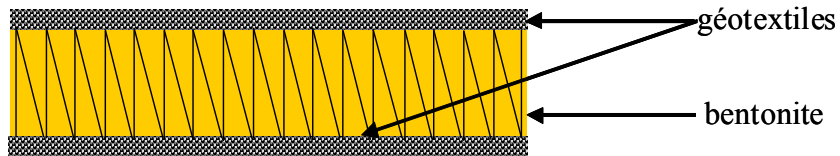


Figure 9 – Schéma d'un géotextile bentonitique aiguilleté

### 2.3.2.3 Géotextiles bentonitiques cousus

Les géotextiles bentonitiques cousus sont constitués d'un géotextile support et d'un géotextile de couverture entre lesquels est contenue une couche de bentonite. Les différentes couches sont liées mécaniquement par un système de coutures (voir figure 10). Certains produits intègrent une structure réservoir contenant / stabilisant la bentonite.

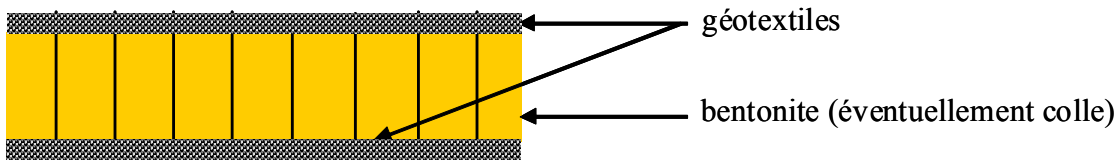


Figure 10 – Schéma d'un géotextile bentonitique cousu

### 2.3.2.4 Géotextiles bentonitiques thermoliés

Les géotextiles bentonitiques thermoliés sont constitués d'un géocomposite associant un géotextile et une structure fibreuse. Le géotextile supérieur est assemblé à la structure fibreuse par thermosoudage après remplissage de celle-ci avec de la bentonite (voir figure 11).

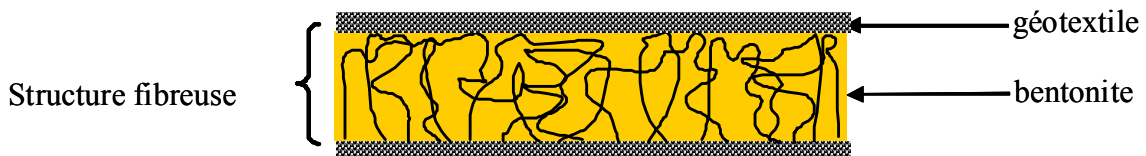


Figure 11 – Schéma d'un géotextile bentonitique thermolié

### 2.3.2.5 Géotextiles bentonitiques enduits avec un revêtement en matière polyoléfine ou de bitume

Les géotextiles bentonitiques peuvent être recouverts par une couche polymérique ou de bitume sur tout ou partie de leur surface.

### 2.3.2.6 Géofilms bentonitiques

Les géofilms bentonitiques sont composés d'un géofilm (voir définition au paragraphe 2.3.1.3), lié à une couche de bentonite ou à un géotextile bentonitique et éventuellement à un ou plusieurs géotextiles (voir figure 12).

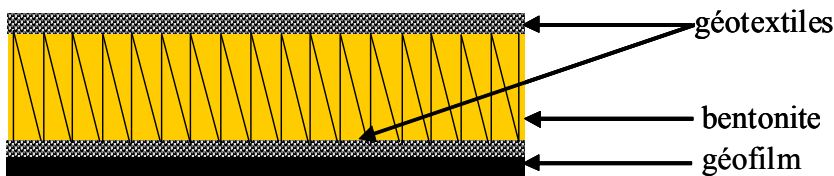


Figure 12 – Schéma d'un géofilm bentonitique

## 2.4 STRUCTURE DE CONFINEMENT ET DE PROTECTION

La structure de confinement et de protection a pour fonction d'apporter une contrainte minimale uniformément répartie afin de limiter le gonflement de la bentonite et ainsi obtenir le niveau d'étanchéité requis.

En effet, les géosynthétiques bentonitiques assurent la fonction "étanchéité" uniquement après hydratation et mise sous contrainte.

### 2.4.1 En fond

La contrainte minimale sur le GSB est apportée par la couche drainante, minérale ou associant géosynthétiques et matériaux granulaires.

Pour une utilisation en fond, il est préférable que le confinement intervienne dans les semaines qui suivent l'installation du DEG.

### 2.4.2 Sur les flancs

Le confinement final sera assuré par les déchets. En cas de remplissage étalé dans le temps et d'absence de confinement par les déchets prolongée, les largeurs de recouvrement doivent être surdimensionnées (0,5m pour des lés de 5m de large, soit 10% de la largeur du lé) en fonction des conditions locales, pour limiter les variations dimensionnelles du GSB en cas de risque identifié de cycles d'hydratation et de dessiccation.

Dans tous les cas la contrainte minimale apportée sur le GSB par la structure de confinement et de protection doit être examinée lors de la conception de l'ouvrage.

### 2.4.3 En couverture

Pour maintenir les performances du GSB dans le temps, il faut :

- maintenir le GSB hors d'atteinte des phénomènes de dessiccation ; les couches de confinement doivent être dimensionnées de telle sorte à atteindre cet objectif ; une épaisseur minimale de 1m de confinement est recommandée pour une couverture imperméable ; d'une manière générale plus l'épaisseur de la couche de confinement est importante plus les risques de dysfonctionnement du DEGB sont faibles ; le confinement est apporté par la superposition de couches ayant des fonctions complémentaires de drainage, de rétention d'eau, antiracinaire et de support de végétation, anti-érosion ; on se référera pour plus de compléments sur la structure de ces couches et leur fonction au guide de l'Ademe (2001) ;

- empêcher les différentes agressions susceptibles d'endommager le GSB (agressions mécaniques, vandalisme, etc.).

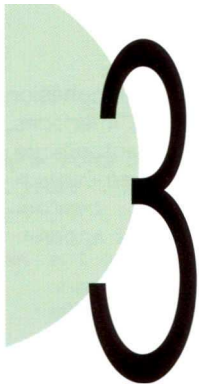
Dans le cas de l'utilisation de matériaux granulaires, la couche en contact avec le GSB devra être bien graduée et respecter les recommandations suivantes afin d'obtenir la répartition la plus uniforme possible de la contrainte de confinement :

- coefficient d'uniformité ( $d_{60}/d_{10}$ ) du matériau supérieur à 4
- coefficient de courbure ( $d_{30}^2/d_{60}.d_{10}$ ) compris entre 1 et 3.

Le matériau ne doit pas présenter de granulats de forme agressive susceptibles de nuire aux fonctions du GSB.

De plus le matériau en contact avec le GSB ne doit pas favoriser l'échange cationique.

La dérogation à ces critères est possible sous réserve qu'elle soit justifiée (essais de laboratoire, expérience similaire, planche d'essais, etc.).



## **3 CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DU DISPOSITIF D'ETANCHEITE comportant un GEOSYNTHETIQUE BENTONITIQUE**

### **3.1 GENERALITES**

Les notions relatives à la conception et à la mise en œuvre des GSB ont été regroupées dans le même chapitre ; ce regroupement traduit l'état actuel de la pratique, où ces deux aspects sont difficilement dissociables.

Le concepteur est en effet amené à choisir les sollicitations à retenir pour le dimensionnement du DEG en fonction :

- des caractéristiques du site ;
- de la destination de l'ouvrage ;
- de la nature chimique du produit stocké ou retenu ;
- des conditions de réalisation, d'exploitation et d'entretien, tout en tenant compte des matériaux disponibles localement.

Il n'y a donc pas de solution unique pour la structure d'un DEG.

Dans tous les cas, la solution retenue cherche à optimiser le coût du DEG dans son ensemble.

Les méthodes de dimensionnement du DEG reposent sur :

- des calculs mettant en œuvre des formules parfois empiriques (lestage : estimation des sous-pressions) ;
- des essais de laboratoire (caractéristiques mécaniques, compatibilité chimique, etc.) ;
- l'expérience de travaux similaires.

### **3.2 CONCEPTION**

La conception d'un DEG est une opération itérative. Elle comprend les étapes successives suivantes :

- identification des paramètres à prendre en compte (§ 3.2.1) ;
- identification de l'emploi du GSB ;

- identification des caractéristiques associées aux fonctions des GSB (§ 3.2.2 tableaux : “caractéristiques fonctionnelles, de mise en œuvre et de durabilité à considérer”);
- examen des caractéristiques spécifiques à un ouvrage (§ 3.2.3 tableau : “critères de choix des GSB”).

Les caractéristiques des GSB identifiées lors de la conception du DEG sont définies par différents textes qui constituent le plus généralement un mode opératoire d'essai (voir § 3.2.4).

### 3.2.1 Paramètres à prendre en compte

Ces éléments résultent de l'analyse du site et des conditions de réalisation et de fonctionnement de l'ouvrage.

Dans tous les cas, les considérations suivantes doivent être vérifiées :

- les GSB ne doivent pas avoir de fonction de renforcement : pour cela la conception du DEG ne doit pas autoriser le développement d'efforts de traction et de cisaillement importants dans le GSB en service ;
- les GSB ne remplissent la fonction d'étanchéité qu'en présence de la structure de confinement ;
- les GSB n'assurent la fonction “étanchéité” qu'après hydratation de la bentonite.

#### 3.2.1.1 Considérations géométriques

Il est conseillé d'adopter des formes géométriques simples pour l'ouvrage afin de faciliter la mise en œuvre du DEG.

#### **Talus**

Le GSB ne doit avoir aucune fonction stabilisatrice vis-à-vis des pentes naturelles ou artificielles (déblais et remblais) sur lesquelles il est placé ou sur lesquelles il vient se raccorder.

Une étude de mécanique des sols doit être réalisée au préalable de manière à s'assurer de la stabilité des pentes de l'ouvrage. Cette étude doit intégrer la destination de l'ouvrage et son fonctionnement à court, moyen et long terme. Les pentes faibles favorisent la réalisation correcte du DEG, en particulier pour les assemblages et la mise en place de la couche de confinement sur le site. Elles facilitent aussi l'accès du personnel et des engins.

Toute pente exige une étude spécifique conformément à la norme XP G38-067 “Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente” portant sur les caractéristiques des différentes couches du DEG et de leurs interfaces. Cette étude doit vérifier la stabilité de l'ensemble sous les contraintes de mise en œuvre et de service propres à l'ouvrage. Cette disposition concerne notamment la structure de confinement.

Cette étude prendra en compte :

- la pente et la hauteur du talus ;
- les caractéristiques de cisaillement interne du GSB (sous contrainte de service) ;
- les angles de frottement et la cohésion des sols et des différentes interfaces, (sols/géosynthétique bentonitique, géosynthétique bentonitique/géomembrane, géosynthétique bentonitique/géotextiles et produits apparentés, etc.) ;
- la hauteur de la nappe phréatique ;
- la présence d'eau localisée ;
- les contraintes de mise en œuvre ;
- les contraintes de service ;

L'étude doit tenir compte des différents états hydriques et thermiques des GSB.

De manière à éviter les recouvrements horizontaux de lés pour de grandes longueurs de rampants, on recommande lors de la conception de l'ouvrage d'intégrer la présence de risbermes.

### **Crêtes des talus**

Les crêtes des talus ou les risbermes doivent être dimensionnées suivant l'ouvrage et les conditions d'accessibilité (voir § 3.3.2.5).

### **Structure support en fond**

S'il existe une pente du fond de forme, elle doit être prise en compte dans le dimensionnement du DEG.

Des formes de pente suffisantes sont réalisées sur la couche support de façon à évacuer les eaux de ruissellement vers des collecteurs et éviter la formation de lentilles d'eau (l'ordre de grandeur des pentes est de 1 à 2 %).

### **Structure support en couverture**

La pente de la couverture est à étudier en fonction des matériaux utilisés de manière à pouvoir mettre en œuvre les matériaux constitutifs de la couverture nécessaires au bon fonctionnement du GSB et de l'amplitude attendue des tassements. La pente minimale recommandée en couverture est de 5%.

#### *3.2.1.2 Conditions climatiques*

Les GSB doivent être recouverts à l'avancement lors de la mise en œuvre (couche de confinement, géomembrane, etc.).

La pose des GSB par temps de pluie est interdite. Toute dérogation à cette règle doit être justifiée techniquement par un tiers-expert.

Si les conditions climatiques rendent impossibles la mise en œuvre des matériaux de confinement ou la circulation sans dommage sur le sol support, l'arrêt du chantier doit être décidé.

#### *3.2.1.3 Sous-pressions*

Les sous-pressions générées par des liquides ou des gaz sont à prendre en compte. Il faut dans ce cas :

- soit équilibrer les sous-pressions par une épaisseur adaptée de la structure de confinement ;
- soit annuler ou limiter les sous-pressions par un dispositif de drainage dimensionné sous le GSB.

Lorsque les effluents liquides drainés viennent en contact avec le GSB, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de risque d'entraînement de la bentonite.

Ce drainage est généralement rapporté mais peut dans certains cas être assuré par le sol en place en couverture ou talus après une étude géotechnique et hydrogéologique approfondie qui précisera par exemple :

- les caractéristiques de perméabilité des sols et matériaux concernés ;
- les niveaux extrêmes de la nappe phréatique ;
- les arrivées latérales d'eau de subsurface.

Le drainage peut être réalisé au moyen d'une couche de matériaux naturels, par des produits synthétiques transmissifs ou par d'autres solutions.

Dans tous les cas, l'effluent drainé doit être évacué.

#### *3.2.1.4 Faune*

L'éventualité de l'action des rongeurs doit être prise en compte au cas par cas.

### 3.2.1.5 Tassement des structures supports

D'une manière générale, la souplesse des GSB permet de s'adapter aux déformations courantes des sols. Cependant l'adaptation du GSB aux tassements attendus doit être vérifiée lors du dimensionnement.

En cas de tassements prévisibles des matériaux sous-jacents (sols, déchets, etc.), on pourra :

- réaliser une structure support limitant les effets de ces phénomènes, en particulier vis-à-vis des mouvements différentiels ;
- substituer ou purger localement les matériaux compressibles ou gonflants ;
- augmenter l'épaisseur de la structure support ;
- renforcer la structure support par compactage, par géosynthétiques ou d'autres techniques ;
- tenir compte des tassements prévus pour dimensionner le GSB : largeur de recouvrement des lés, résistance/déformation du GSB, etc.

Lorsque l'un des quatre premiers choix est retenu, il faut définir à la conception la portance minimale requise. Dans ce cas, la portance de la structure support doit être contrôlée lors de la réception.

Les structures rigides d'un DEG (drains par exemple) posées sur une assise déformable, doivent faire l'objet d'une étude préalable.

La conception et la réalisation des recouvrements, des différents raccordements du GSB aux ouvrages rigides tels que massifs en béton, canalisations, doivent tenir compte des mouvements différentiels dus aux matériaux présents dans la zone des raccordements (prévoir par exemple un apport supplémentaire de bentonite).

### 3.2.1.6 Erosion et instabilité des sols sous-jacents et sus-jacents au G.S.B.

L'étude géotechnique préalable doit identifier les risques d'érosion ou d'instabilité des sols sous-jacents et sus-jacents au GSB.

Dans tous les cas le GSB ne constitue jamais un élément de renforcement mécanique de la structure de protection et/ou de confinement.

La structure support doit être dimensionnée en tenant compte du risque d'érosion et d'effondrement.

Le risque d'érosion de la structure de confinement (pluie, écoulement, etc.) doit faire l'objet d'un examen. En couverture si nécessaire, cette couche doit être protégée avant la reprise de la végétation.

### 3.2.1.7 Poinçonnements

Le DEG doit être conçu de telle sorte que le GSB ne puisse pas être poinçonné, en particulier sous les sollicitations mécaniques statiques ou dynamiques résultant de l'application de charges :

- temporaires lors de la mise en œuvre ou au cours d'opérations d'entretien (circulation et manœuvres des engins, mise en place des matériaux de la structure de protection et/ou de confinement, etc.) ;
- permanentes : ce cas est peu fréquent du fait de l'existence de la structure de protection et/ou de confinement.

La conception doit aboutir à l'adéquation entre les caractéristiques de la structure d'étanchéité et les caractéristiques géométriques des structures support et de protection et/ou de confinement.

Une expérimentation en laboratoire avec les matériaux du site ou sur chantier permet, si nécessaire, d'optimiser le dimensionnement vis-à-vis du poinçonnement mécanique.

### 3.2.1.8 Agressions chimiques

Les auscultations de DEG après plusieurs années de service ainsi que les résultats de la recherche, soulignent la tendance qu'a la bentonite sodique à échanger le sodium, initialement présent dans l'espace interfoliaire de son argile (smectite), avec d'autres cations (surtout l'ion calcium) apportés par les fluides avec lesquels la bentonite vient en contact. Cet échange est lié à la plus forte affinité (d'un point de vue thermodynamique) des sites d'échange (qui sont situés dans l'espace interfoliaire) de la smectite pour les cations divalents (comme le calcium) plutôt que monovalents (comme le sodium). Il a notamment pour effet de modifier la structure de la bentonite et par conséquent sa perméabilité.

En effet, comme il est illustré à la figure 13, lorsque c'est l'ion calcium qui est présent dans l'espace interfoliaire de la smectite, les feuillets d'argile s'assemblent par gros "paquets" (ou particules) tandis que l'eau présente dans la porosité située entre les particules est mobile, d'où la perméabilité du matériau. Par contre lorsque c'est l'ion sodium qui est présent dans l'espace interfoliaire, les feuillets d'argile sont très espacés (on parle d'une structure de type "gel") et l'eau présente dans la porosité entre les particules ou feuillets est liée par des forces électrostatiques et donc peu mobile, d'où la faible perméabilité du matériau.

Dans la pratique, s'il n'est pas possible de totalement se prémunir contre de tels échanges, des précautions de mise en oeuvre peuvent par contre permettre de minimiser leurs effets.

Dans le cas de GSB à base de bentonite sodique on évitera, dans la mesure du possible, d'utiliser des matériaux de confinement calcaires, car l'eau de pluie qui va s'infiltrer dans la couverture va s'enrichir en ions calcium.

Dans le cas où il n'y a pas de géomembrane en couverture et pour s'assurer que le premier fluide d'hydratation ne soit pas riche en cations divalents, on pourra utiliser une couche de pose sableuse humide dont la teneur en eau va s'équilibrer avec celle du GSB et permettre ainsi son hydratation. Une alternative consiste à provoquer l'humidification volontaire par arrosage à l'aide d'un liquide non agressif, à évaluer au cas par cas.

La sensibilité de la bentonite sodique vis à vis d'agressions cationiques implique que la bentonite soit aussi exempte que possible de carbonate de calcium dans sa composition initiale. D'après les informations disponibles, une teneur pondérale en  $\text{CaCO}_3$  de 5% semble être une limite à ne pas dépasser. En effet, lors du contact de la bentonite avec de l'eau de pluie d'infiltration, ce carbonate peut se dissoudre, libérant des ions calcium qui pourront alors s'échanger avec le sodium de la smectite.

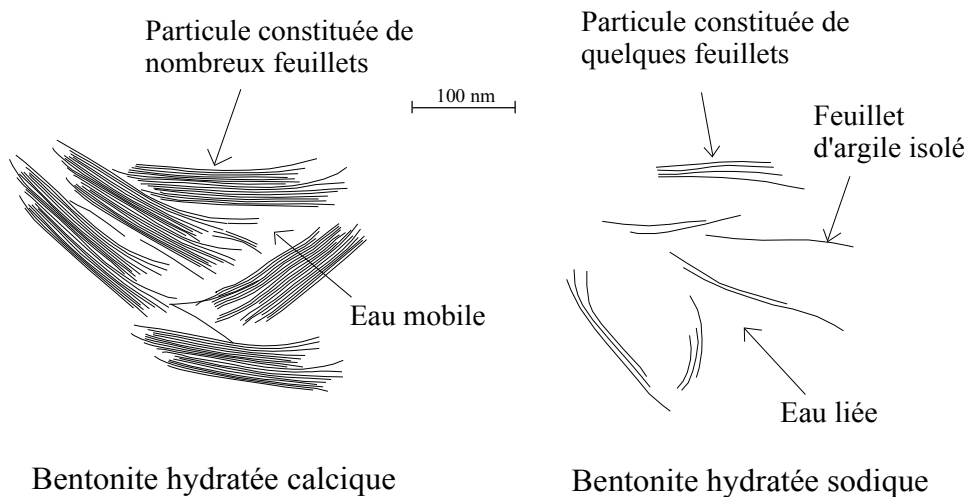


Figure 13 – Bentonites hydratées calcique et sodique (Modifié d'après Guyonnet et al. (2005))

### 3.2.1.9 Retrait

Lorsqu'un GSB est placé sous une géomembrane exposée au soleil, une variation dimensionnelle des lés pouvant aller jusqu'à leur séparation peut être observée (voir figure 14). Dans les différents cas de figure où l'observation d'une séparation des lés de GSB a été réalisée et dont la littérature fait état la géomembrane était texturée.



Thiel et Richardson (2005) et Koerner et Koerner (2005 a, b) ont avancé différentes explications à ce phénomène dont ils ont vérifié expérimentalement au laboratoire qu'elles permettaient d'expliquer l'ordre de grandeur des écartements entre lés observés sur le terrain :

- un retrait de la bentonite dû à la dessiccation, potentiellement amplifié par l'alternance de cycles d'humidification-dessiccation de la bentonite ;
- une tension dans le GSB en particulier sur pente conduisant à une réduction dimensionnelle des lés dans la largeur ;
- une troisième hypothèse qui n'a pas pu être vérifiée a été avancée : la contraction des lés de GSB dus aux cycles d'extension et de contraction de la géomembrane texturée qui tend à entraîner les GSB vers le centre du lé. Les variations dimensionnelles des géotextiles seuls au cours de cycles d'humidification-dessiccation ne suffisent pas à expliquer les phénomènes observés.



Figure 14 – Photographie illustrant l'écartement entre lés après que la géomembrane ait été retirée (d'après Thiel et Richardson, 2005)

Les recommandations du comité français des géosynthétiques basées sur l'analyse de la littérature sont les suivantes :

- la largeur de recouvrement des lés doit être augmentée par rapport à la normale. Elle doit être adaptée en fonction de la longueur du lé, de la pente, du temps d'exposition, de l'orientation du talus :

- $\leq 5$ m de rampant : 0,3m ;
- entre 5 et 20m : 0,4m ;
- entre 20 et 40m : 0,6m.

- dans l'hypothèse où le phasage d'exploitation le permet on limitera la période pendant laquelle la géomembrane recouvrant le GSB est exposée ;

- pour éviter la transmission d'efforts au GSB, on préférera l'utilisation d'une géomembrane lisse au contact du GSB ;

- dans l'état des connaissances actuelles on ne doit pas non plus utiliser des GSB comportant des géotextiles non tissés aiguilletés des deux côtés de la bentonite sauf si l'un d'eux est renforcé.

### 3.2.1.10 Végétation

Les racines venant en contact d'un GSB et susceptibles de le traverser peuvent provoquer une diminution de l'étanchéité de l'ouvrage.

Il convient donc de prendre les dispositions préventives suivantes :

- débarrasser la structure support de toute végétation ;
- semer une végétation de type prairiale régulièrement entretenue ;
- entretenir régulièrement l'ouvrage (arrachage, fauchage, tonte, etc.) pour maîtriser le développement de la végétation.

### 3.2.1.11 Structure de drainage associée en couverture

On recommande un système de drainage sur le GSB, continu ou par bandes. Le dimensionnement est à effectuer en fonction des contraintes pluviométriques, de la nature des matériaux constitutifs de la couverture et de la pente. On pourra se référer au Guide BRGM-Ademe (2001) relatif au dimensionnement et à la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés pour ce dimensionnement.

### 3.2.2 Caractéristiques des géosynthétiques bentonitiques

La prise en compte des paramètres définis au § 3.2.1 et le choix du type d'emploi des GSB conduisent le concepteur à définir pour chacun des matériaux constitutifs du DEG la ou les fonctions attendues.

Les GSB peuvent être employés en "étanchéité simple" ou en "étanchéité combinée".

Un géosynthétique bentonitique est employé en "étanchéité simple" lorsque l'étanchéité de l'ouvrage est assurée par le géosynthétique bentonitique (participation active).

Un géosynthétique bentonitique est employé en "étanchéité combinée" lorsque l'étanchéité de l'ouvrage est assurée principalement par un autre géosynthétique ou un produit naturel. Le géosynthétique bentonitique participe de façon passive à l'étanchéité de l'ouvrage.

L'unique fonction des GSB est l'étanchéité.

L'identification des caractéristiques des GSB résulte d'une démarche en deux temps :

- premièrement l'identification des "fonctions" à partir de "l'emploi" des GSB dans l'ouvrage ;
- deuxièmement l'identification des "caractéristiques à considérer" à partir des "fonctions" retenues (voir tableaux 2 à 4 relatifs aux "caractéristiques à considérer").

Les caractéristiques sont classées en trois groupes (une même caractéristique peut appartenir à plusieurs groupes) :

- caractéristiques fonctionnelles des GSB : ce sont les caractéristiques minimales qu'ils doivent présenter pour assurer leur fonction dans l'ouvrage ;
- caractéristiques de mise en œuvre des GSB : ce sont les caractéristiques minimales qu'ils doivent présenter pour que les conditions de mise en œuvre plus ou moins sévères n'altèrent pas leurs caractéristiques fonctionnelles ;
- caractéristiques de durabilité des GSB : ce sont les caractéristiques minimales qu'ils doivent présenter pour que leur fonction soit assurée tout au long de la vie de l'ouvrage. Cette durée fait partie des hypothèses de l'étude.

Les tableaux 2 à 4 définissent les caractéristiques des GSB en tenant compte de la fonction étanchéité assurée et des exigences de mise en œuvre et de durabilité.

Une propriété des GSB est leur aptitude à limiter une fuite ponctuelle sur l'élément principal d'étanchéité (cas des étanchéités combinées).

Cette propriété est différente de l'autocicatrisation. L'auto-cicatrisation est définie comme la capacité des géosynthétiques bentonitiques à refermer une perforation ponctuelle de plus grande dimension inférieure à 2 cm (voir figure 15).

L'aptitude à l'autocicatrisation doit être examinée en tenant compte de l'environnement du GSB (nature du sol support, DEG, état hydrique, conditions de mise en œuvre, exploitation de l'ouvrage).

Il existe des cas d'utilisation d'un géosynthétique bentonitique en tant que matériau de protection au-dessus de la géomembrane. Pour la conception et le dimensionnement de cet usage particulier on se rapprochera des tiers-experts compétents.

Les tableaux 2 à 4 définissent les caractéristiques des GSB pour la fonction étanchéité et des exigences de mise en œuvre et de durabilité.

Dans ces tableaux, les caractéristiques nécessaires sont suivies d'un (N) et les caractéristiques applicables sont suivies d'un (A) avec les définitions suivantes :

- "Nécessaire (N)" : la caractéristique doit être examinée dans tous les cas et spécifiée dans le cahier des charges de l'ouvrage. Cette spécification peut se traduire par (1) une valeur quantifiée (seuil) et mesurable ou (2) une exigence technique éventuellement validée par une planche d'essais et/ou le retour d'expérience ;
- "Applicable (A)" : la caractéristique peut être à examiner dans certains cas. Quand le concepteur juge la caractéristique nécessaire, elle doit être spécifiée suivant le principe défini ci-avant, c'est notamment le cas des caractéristiques mécaniques sur les pentes.



Figure 15 – Autocicatrisation

Tableau 2 – Caractéristiques fonctionnelles à considérer pour la fonction étanchéité

Eléments concernés	Caractéristiques fonctionnelles
bentonite	granulométrie à sec (A) valeur de bleu (A) absorption d'eau (A) indice de gonflement (N) minéralogie (N) teneur en carbonates (N) capacité d'échange cationique (CEC) (N) signature isotopique (A)
GSB	retrait (A) autocatrisation (A) masse surfacique de bentonite à 0% de teneur en eau (N) masse surfacique du GSB (N) épaisseur (N) flux sous contrainte (N) gonflement sous contrainte de confinement (N) cisaillement interne (A) ** pelage (A) ** flux aux recouvrements (N) traction (A) ** conteneurisation (N) stress cracking (A)*** résistance à l'éclatement (A)***
DEG	frottements d'interface (stabilité du DEG sur pente (étude géotechnique)) (N) *

\* La stabilité sur pente couvre aussi la stabilité des ancrages.

\*\* sur pente

\*\*\* pour les géofilms bentonitiques

Tableau 3 – Caractéristiques de mise en œuvre à considérer pour la fonction étanchéité

Éléments concernés	Caractéristiques de mise en oeuvre
bentonite	teneur en eau (N)
GSB	traction (N) dommages lors de la mise en œuvre (N) cisaillement interne (A) poinçonnement dynamique (A) conteneurisation (N)
DEG	frottements d'interface (stabilité du DEG sur pente (étude géotechnique)) * (N) perçement par granulats sur support rigide (A)

\* La stabilité sur pente couvre aussi la stabilité des ancrages.

Tableau 4 – Caractéristiques de durabilité à considérer pour la fonction étanchéité

Éléments concernés	Caractéristiques de durabilité
bentonite	teneur en eau (A) vieillessement (N) minéralogie (N)
GSB	cisaillement interne (A) traction (N) conteneurisation (N) résistance à la dégradation chimique, biologique, climatique (A)
DEG	frottements d'interface (stabilité du DEG sur pente (étude géotechnique)) * (N) poinçonnement statique (N)

\* La stabilité sur pente couvre aussi la stabilité des ancrages.

La durabilité du DEG peut être définie comme étant la durée pendant laquelle ses matériaux constitutifs conservent leurs caractéristiques fonctionnelles.

### 3.2.3 Critères de choix des géosynthétiques bentonitiques

L'importance de l'examen des différentes caractéristiques définies au § 3.2.2 d'un GSB, est liée à l'usage qu'il assure dans un ouvrage.

Le tableau 5 précise, pour les principaux cas d'utilisation des GSB et pour leurs principales caractéristiques, le niveau d'importance de leur examen. Il est établi à titre informatif.

Les classements indiqués sont proposés et doivent être confirmés par le maître d'œuvre.

Le maître d'œuvre doit s'assurer de leur pertinence au regard des spécificités éventuelles d'un projet.

Dans le tableau 5, le niveau d'importance de l'examen des principales caractéristiques des GSB est défini par les chiffres de 0 à 3 avec les définitions suivantes :

- 0 : examen de la caractéristique sans importance ou sans objet ;

- 1 : importance de l'examen de la caractéristique faible ;
- 2 : importance de l'examen de la caractéristique moyenne ;
- 3 : importance de l'examen de la caractéristique élevée.

Ce classement proposé ne définit pas un niveau de performance attendu pour les différentes caractéristiques.

Tableau 5 – Importance de l'examen des principales caractéristiques des GSB

Positionnement dans l'ouvrage	Propriétés hydrauliques						Propriétés mécaniques						Durabilité		
	perméabilité à l'eau (flux)	perméabilité des joints à l'eau	perméabilité aux gaz	perméabilité des joints aux gaz	perméabilité aux lixiviats	perméabilité des joints aux lixiviats	poinçonnement statique	poinçonnement dynamique	traction	allongement	cisaillement interne	frottement externe	gel-dégel	dessiccation	durabilité chimique
Fond	3	3	0	0	3	3	3	3	1	1	1	1	1 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	3
Talus	3	1	0	0	2	2	3	3	3	2	3 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	1 <sup>2</sup>	1 <sup>4</sup>	3
Couverture															
pente ≤ 5%	3	3	3	3	0	0	2	3	2 <sup>5</sup>	3	1	1	3	3	3
pente > 5%	3	3	3	3	0	0	2	3	3	3	3	3	3	3	3

<sup>1</sup> Cette caractéristique intervient lors du calcul de la stabilité des déchets (pendant et après exploitation) ou lors de la mise en œuvre du DEGB et des remblais

<sup>2</sup> Applicable aux projets concernés par cette sollicitation

<sup>3</sup> Le fond est systématiquement recouvert par la couche de confinement

<sup>4</sup> S'applique notamment en phases de construction et d'exploitation des ISD

<sup>5</sup> En lien avec le passage des engins

### 3.2.4 Essais

La stabilité des DEG est vérifiée en particulier par une étude géotechnique qui tient compte notamment des caractéristiques des GSB et de toutes les interfaces du DEG. De plus l'étude géotechnique intègre nécessairement la variation éventuelle de ces caractéristiques en fonction du temps ou de la teneur en eau des produits.

La surveillance de la qualité du DEG passe notamment par la maîtrise de celle du GSB dont la vérification des caractéristiques est réalisée :

- lors de la fabrication ;
- à la réception sur site ;
- après la mise en œuvre.

L'avancement actuel de la normalisation ne permet pas d'attribuer systématiquement pour chacune des caractéristiques une norme applicable explicitement aux GSB. Cependant l'annexe C propose une liste des normes correspondant aux caractéristiques citées au § 3.2.2 listées dans les tableaux 2 à 4. L'objectif ici n'est pas de réaliser une liste de normes exhaustive, mais bien de préciser les caractéristiques importantes à mesurer, et les normes correspondantes. Lorsque cela était possible, on a également précisé en annexe C des valeurs pour les différentes caractéristiques, ou des gammes de valeurs.

L'annexe C identifie les normes qui sont directement applicables aux GSB ou à l'un de ses composants.

Les essais qui permettent de caractériser les produits à l'aide de modes opératoires reproductibles qui ne sont pas forcément représentatifs des conditions réelles d'emploi sont appelés "essais d'identification". Ils sont utilisés notamment :

- en contrôle de production ;
- en contrôle d'identification des produits ;
- en contrôle de réception sur site.

Les essais qui déterminent le comportement des produits dans des conditions qui se rapprochent des conditions réelles d'utilisation sont appelés "essais de performance".

Des épreuves de convenance in situ peuvent selon le cas se substituer ou compléter les essais de performance.

Dans l'objectif de pouvoir réaliser au cours de la durée de vie du site des essais complémentaires, un échantillon de quelques mètres carrés de GSB doit être conservé avec un conditionnement permettant de prévenir déformation et absorption d'humidité.

### **3.3 MISE EN OEUVRE**

En préalable à la réalisation des ouvrages, une organisation du chantier doit être définie par le maître d'œuvre et les entreprises afin de préciser notamment :

- dans le plan de phasage :

- les phases préparatoires du chantier (accès aux différentes parties du chantier, aire de stockage, etc.) ;
- les différentes phases de travaux ;
- les phases d'arrêt et de reprise du chantier notamment en cas d'intempéries (principe d'arrêt et de reprise de la mise en œuvre des matériaux, voir § 3.4).

- dans le plan de pose :

- le sens de déploiement des géosynthétiques en tenant compte de la géométrie de l'ouvrage, de la position des points singuliers et des contraintes de protection des différentes structures (fond de forme, structure support, structure d'étanchéité).

Lors de la réalisation du chantier un plan de récolement doit être réalisé et tenu à jour.

Les contrôles associés à l'organisation du chantier sont définis au chapitre 4.

### 3.3.1 Structure support

#### 3.3.1.1 Végétation

Dans le cadre de travaux de reprise de couverture finale, en complément aux indications des paragraphes 3.2.3 et 3.2.4, la couche support doit être dégagée de toute végétation et terre végétale et purgée d'éventuels dépôts superficiels de matières organiques.

On évite ainsi le contact direct des souches et des racines avec le DEG et la décomposition des matières organiques qui entraînerait des tassements différentiels et le dégagement de gaz.

On évitera tous traitements herbicides de surface qui peuvent avoir un impact chimique sur le GSB (voir § 3.2.1.8).

#### 3.3.1.2 Compactage

La structure support doit être compactée en respectant les règles définies par l'étude de mécanique des sols pour l'ouvrage considéré.

Les caractéristiques du sol support à l'issue de sa mise en oeuvre doivent être maintenues jusqu'à la pose du GSB.

#### 3.3.1.3 Qualité du sol support

Dans le cas où la structure support est inadaptée, une couche support est réalisée avec un matériau d'apport dont la surface en contact avec le GSB est fermée (argile en fond notamment, sable, matériaux liés, géosynthétiques en flancs et en couverture, etc.). Il est nécessaire :

- d'adapter la granulométrie du matériau d'apport au GSB ;
- de veiller à ne pas créer de ségrégation du matériau d'apport lors de son transport et de sa mise en oeuvre ;
- de contrôler, après compactage, l'état de surface et retirer tout élément agressif.

Les matériaux pulvérulents, sensibles au ravinement et à la circulation de chantier peuvent être stabilisés : traitement par différents liants, matériaux d'apport moins sensibles. Les caractéristiques chimiques du matériau après stabilisation aux liants doivent être compatibles avec les géosynthétiques bentonitiques et les éventuels géosynthétiques associés.



Figure 13 – Illustration d'un mauvais et d'un bon état de surface sur pente (d'après Touze-Foltz et al. (2008))



Les engins de chantier ne doivent pas entraîner de déformation ou de modification de l'état de surface de la couche support (ornière, apport ou déchaussement de caillou isolé).

Sauf spécification particulière du maître d'œuvre, les ornières doivent être systématiquement remblayées avec un matériau ayant des caractéristiques mécaniques équivalentes à celles de la couche support (voir figure 16).

La couche support peut comprendre des géotextiles anti-poinçonnants, des géotextiles ou produits apparentés de renforcement et/ou drainants et/ou filtrants adaptés au DEG. Leur mise en œuvre est réalisée suivant les prescriptions des fascicules du CFG correspondants.

La structure support doit être exempte de flaques d'eau, y compris gelées, lors de la mise en œuvre de la structure d'étanchéité.

La couche support ne doit pas être gelée lors de la pose du GSB.

### 3.3.2 Structure d'étanchéité

#### 3.3.2.1 Conditionnement et étiquetage

Les GSB doivent être commercialisés en rouleaux protégés par un emballage étanche (voir figure 17).

Chaque rouleau porte un étiquetage précis permettant son identification et un contrôle de suivi de la qualité lors de la fabrication (voir figures 17 et 18).

Chaque rouleau doit porter le marquage CE, un étiquetage précis permettant son identification, sa traçabilité jusqu'à la fabrication et les consignes de sécurité pour la manutention.

#### 3.3.2.2 Stockage et transport

Toutes précautions doivent être prises pour ne pas endommager le GSB lors d'un stockage tant en usine que sur chantier, à savoir :

- disposer d'une aire plane et drainée, de portance suffisante, débarrassée de tous éléments agressifs ;
- stocker les rouleaux à plat dans la même direction sur plusieurs niveaux (4 niveaux maximum et selon les spécifications de stockage des produits) (voir figures 17 et 18) ;
- mettre en place, en cas de stockage prolongé, une protection complémentaire contre les agressions climatiques (pluie, UV) (voir figure 17).



Figure 14 – Visualisation d'une protection complémentaire possible des rouleaux correctement emballés, stockés et étiquetés

De même, pendant le transport et les opérations de chargement et de déchargement, il convient de prendre toutes les dispositions destinées à éviter l'endommagement des rouleaux.

En cas d'endommagement du conditionnement, le rouleau doit être identifié et le conditionnement doit être réparé. Lors de sa mise en œuvre, les parties endommagées du GSB seront rejetées. On pourra se référer au chapitre 4 pour tout ce qui concerne les contrôles.



Figure 15 – photographie montrant les rouleaux de GSB emballés; étiquetés et correctement stockés

### 3.3.2.3 Plans de pose et de récolement

L'entrepreneur en concertation avec le maître d'œuvre doit établir un plan de pose indiquant :

- le sens de déploiement des géosynthétiques ;
- la nature de la face visible du GSB qui doit répondre aux prescriptions du fabricant ;
- la localisation de l'assemblage des différents lés, en tenant compte de la géométrie prévue de l'ouvrage ;
- le repérage des recouvrements ainsi que les découpes particulières ;
- le mode d'assemblage des lés (recouvrement, matière d'apport, etc.) ;
- le mode d'assemblage des points particuliers tels que les raccordements aux ouvrages ;
- le positionnement des tranchées d'ancrage et le type d'ancrage envisagé.

A l'issue de l'installation des géosynthétiques bentonitiques, un plan de récolement permettant de mémoriser le positionnement réel des lés, les numéros de rouleaux de GSB, le repérage des recouvrements, les points singuliers, les prélèvements d'échantillons, les positions des réparations, etc. sera délivré. Il sera élaboré à l'avancement de la pose.

### 3.3.2.4 Mise en place

La mise en place des GSB comprend, dans l'ordre, les opérations suivantes :

- manutention, déroulage, positionnement ;
- mise en recouvrement des lés ;
- ancrages ;
- raccordements aux ouvrages singuliers ;
- contrôle de mise en œuvre (Voir chapitre 4) ;
- structure de confinement et de protection ;

Ces différents points sont présentés dans la suite

#### **Manutentions**

Les rouleaux sont manutentionnés à l'aide d'engins mécanisés équipés d'un système de levage/déroulage (portique, palonnier, etc.) (voir figures 19 et 20).

Les opérations de manutention doivent être limitées à leur strict minimum pour éviter, en particulier, la détérioration de l'état de surface de la structure support.

Elles doivent permettre d'optimiser le positionnement des rouleaux en vue de l'opération de déroulage.

Les rouleaux ne doivent pas être traînés sur le sol ou manipulés en contact direct avec les fourches d'un élévateur.



Figure 16 – Déchargement des rouleaux avec du matériel adapté

### Déroutage

Avant le déroulage, il y a lieu de s'assurer des points de contrôle indiqués au paragraphe 4.2.3.

Le déroulage doit permettre la bonne exécution des opérations ultérieures.

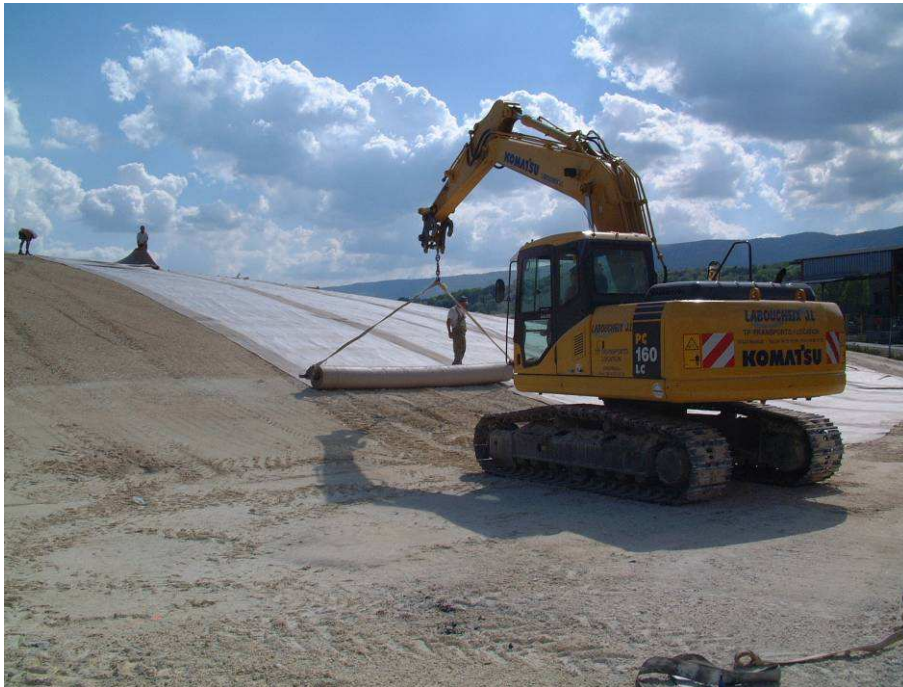


Figure 20 – Illustration du déroulage et du contrôle de la largeur de recouvrement

Lors de la pose on doit veiller en particulier à :

- respecter les largeurs minimales de recouvrement (voir figure 20) ;
- respecter la conception des ancrages ;
- dérouler sur talus, en règle générale, de haut en bas pour faciliter la mise en œuvre et éviter la dégradation du support (voir figure 21); dans le cas où le support serait dégradé, il faut prévoir sa restauration par un engin adapté avant déroulage ;

- positionner sur talus, la direction de pose et de déroulement suivant la ligne de plus grande pente (voir figure 22) ;
- si la longueur du talus le permet, proscrire tous les recouvrements horizontaux ;
- interdire à tout véhicule de circuler sur le GSB, sauf dispositions particulières à justifier par l'entreprise auprès du maître d'œuvre.



*Figure 21 – Illustration du déroulage de haut en bas sur talus*



*Figure 22 – Illustration sur talus de la pose selon la ligne de plus grande pente*

### **Mise en recouvrement des lés**

Un recouvrement des lés est nécessaire pour assurer la continuité de l'étanchéité lors de la pose et en service. Les valeurs des recouvrements recommandées sont :

- En fond :

- dans le sens de la longueur des lés (en bordure) la valeur minimale retenue est de 0,2 à 0,3m sur toute la longueur. Cependant cette valeur doit être examinée par le maître d'œuvre au regard des spécificités du projet ;
- aux extrémités des rouleaux : au moins 0,5m pour compenser, en complément de l'adaptation du GSB au support, les éventuels défauts d'extrémité (perte de bentonite, effets des moyens de mise en œuvre, etc.);
- dans le cas particulier des recouvrements en pied de talus cette largeur sera d'au moins 1m.

- Sur Talus :

Conformément aux prescriptions indiquées dans le paragraphe 3.2.1.9 relatif au retrait sur pente, la largeur de recouvrement est à adapter en fonction de la longueur de rampant :

- $\leq 5$ m de rampant : 0,3m ;
- Entre 5 et 20m : 0,4m ;
- entre 20 et 40m : 0,6m.

- En couverture :

On recommande des largeurs de recouvrement de 0,5m dans le sens de la longueur des lés et de 1m aux extrémités des rouleaux dans le cas où des tassements sont attendus.

Les recouvrements doivent être effectués avec le plus grand soin.

Dans le cas de recouvrements multiples, on accepte la superposition de plusieurs éléments en un point donné (voir figures 23 et 24). Il faut éviter les recouvrements quadruples.

Tous les points singuliers doivent être étudiés avec précaution. La maîtrise d'œuvre devra s'assurer auprès de l'étanchéur des détails d'exécution.

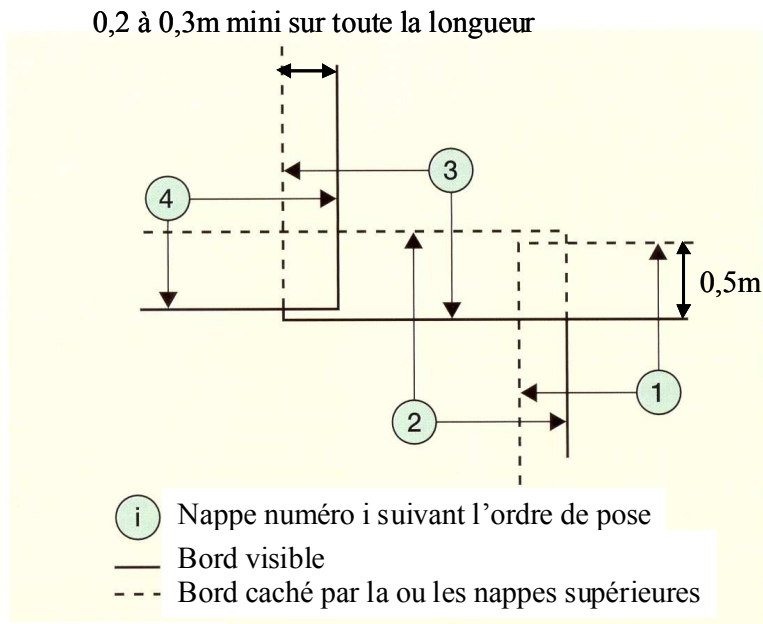


Figure 23 – 2 points triples

Pour assurer la continuité de l'étanchéité au droit du recouvrement il faut :

- que tous les lés soient parfaitement tendus de façon à interdire tous plis ou irrégularités ;
- que les lés soient en contact avec la couche support ;
- que les lés soient plaqués l'un contre l'autre, notamment au droit des changements de pente ;
- que la zone de recouvrement soit exempte de corps étrangers.

Le recouvrement s'effectuera en tuiles dès lors qu'il y a une pente. Ainsi les éventuels écoulements n'introduiront pas de particules dans l'assemblage par exemple.



Figure 24 – Point multiple

## Etanchéité des recouvrements

L'étanchéité de la zone de recouvrement propre et plane sera assurée par la présence (préimprégnation en usine) ou l'apport de bentonite granulaire ou en poudre ou en pâte (voir figures 25 et 26) de même nature que la bentonite contenue dans le GSB selon les recommandations du producteur.

Matériau d'étanchéité (bentonite granulaire, en poudre ou en pâte ou colle)

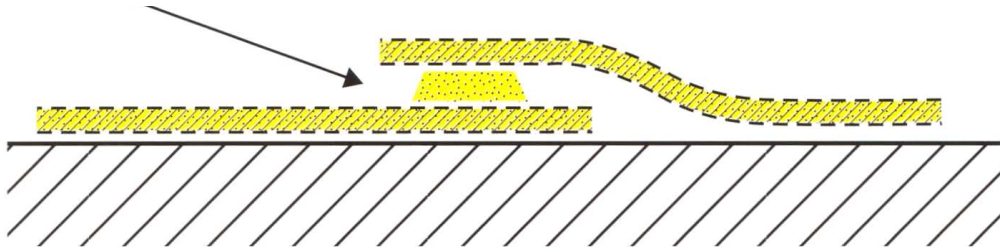


Figure 17 – Recouvrement avec apport de bentonite



(a)



(b)



Figure 18 – Apport de bentonite (a) en pâte et (b) en poudre

Un apport de bentonite continu d'un minimum de 500g/ml sur le lé inférieur, et d'épaisseur homogène doit être réparti sur la largeur du recouvrement.



Au moment du recouvrement par le lé supérieur, la bentonite doit rester en place.

De la colle pourra également être utilisée dès lors que les pentes ou la jonction aux ouvrages l'imposent.

Le traitement de la zone de recouvrement des lés doit être suivi le plus rapidement possible de la mise en œuvre de la structure de confinement et de protection.

### 3.3.2.5 Ancrages et raccords

La largeur minimale de la crête de talus est de :

- 1,5 m lorsque l'ancrage est réalisé par enfouissement dans une tranchée ou par simple lestage ;
- 4 m si des engins doivent y circuler.

Dans les cas où ces largeurs ne sont pas disponibles, on fait appel à d'autres techniques de fixation telles que le chevillage d'un profilé plaquant le GSB sur un support rigide lorsque le GSB est positionné sur un ouvrage en béton.

Le remplissage des tranchées d'ancrages doit se faire uniquement avec les matériaux naturels dont les caractéristiques sont à l'origine de son dimensionnement. Le remplissage, même partiel, avec des déchets issus du chantier (chutes, découpes, emballages, etc.) est proscrit.

Dans la suite, un recouvrement est systématiquement indiqué dans les figures. Celui-ci peut être assuré par les déchets dans le cas de talus internes à l'ouvrage.

#### Ancrage en tête

L'ancrage en tête a généralement pour rôle d'empêcher le déplacement du GSB sur le talus.

L'expérience montre qu'il est parfois nécessaire que le GSB soit maintenu provisoirement en tête de talus par un lestage ponctuel avant la mise en œuvre du matériau d'ancrage définitif.

Le cas échéant, des fixations ponctuelles (épingles en fer à béton) sont utilisées.

En pratique, l'ancrage en tête se réalise par enfouissement dans une tranchée dimensionnée (voir figure 27).

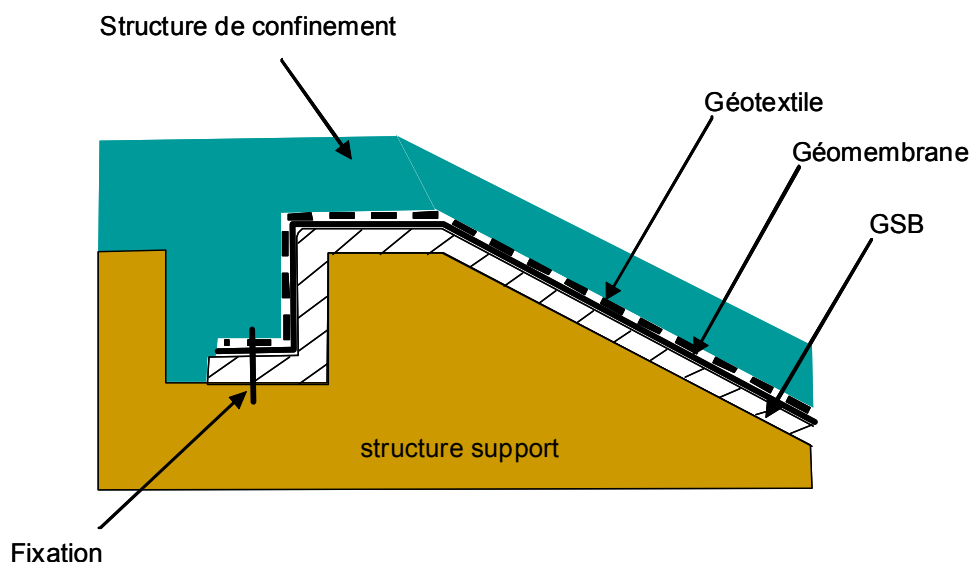


Figure 19 – Schéma de principe d'un ancrage en tête par enfouissement dans une tranchée (exemple)

D'autres solutions par lestage sont également pratiquées, selon la figure 28, en prenant les dispositions nécessaires pour que le cordon de lestage ne s'érode pas dans le temps. Le calcul de stabilité des ancrages doit tenir compte des conditions de frottement relatives aux différents constituants du DEG.

Les longueurs minimales seront à dimensionner par la réalisation d'un calcul de stabilité.

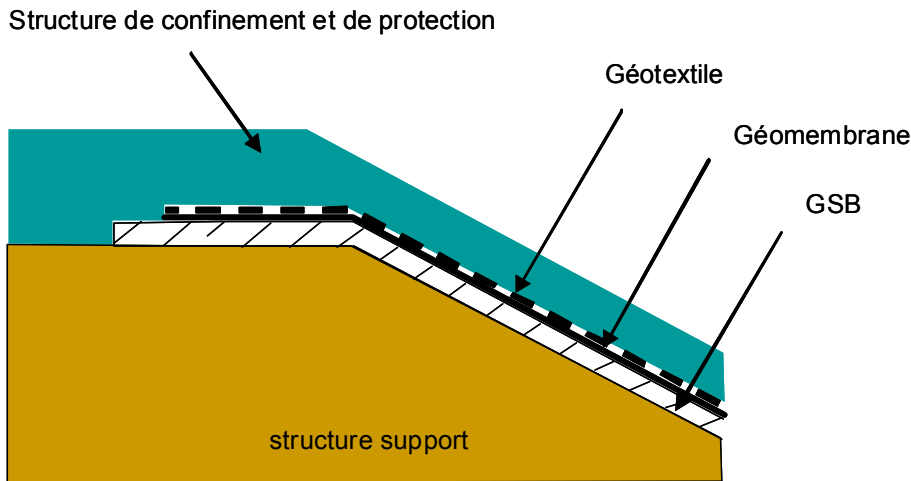


Figure 20 – Schéma de principe d'un ancrage en tête par simple lestage

#### Ancrage intermédiaire

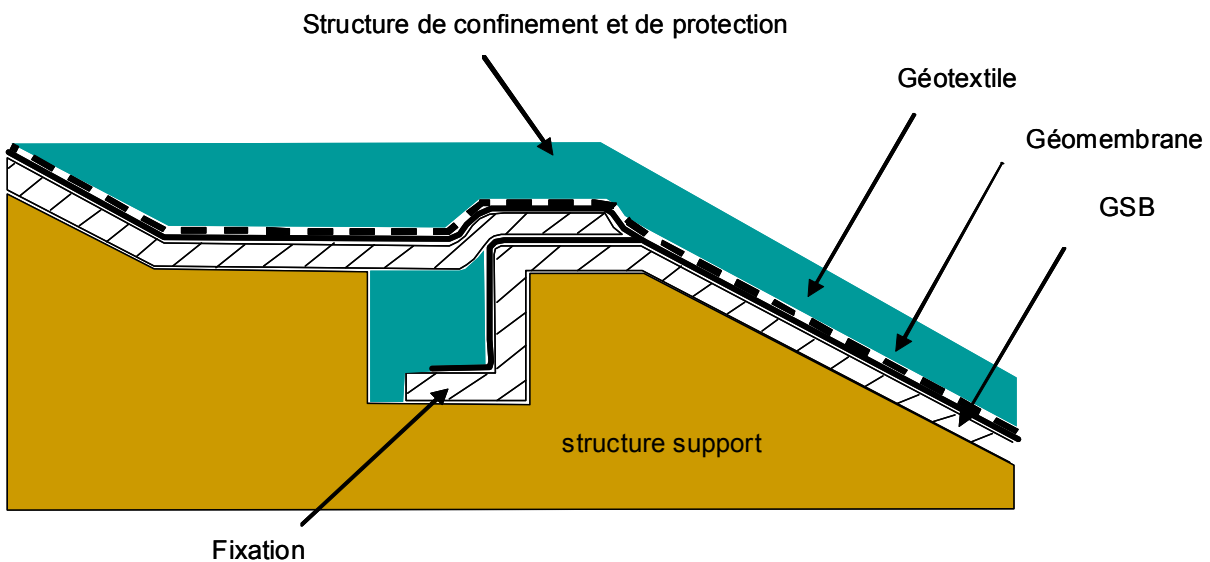


Figure 21 – Schéma de principe d'un ancrage intermédiaire en tranchée avec joint

Les ancrages intermédiaires sont généralement utilisés dans le cas de longueurs de talus importantes.

Sur les talus avec risberme, ces ancrages peuvent être réalisés au niveau de celle-ci comme indiqué sur les schémas de principe des figures 29 et 30.

Les dispositions relatives aux ancrages en tête s'appliquent aux ancrages intermédiaires.

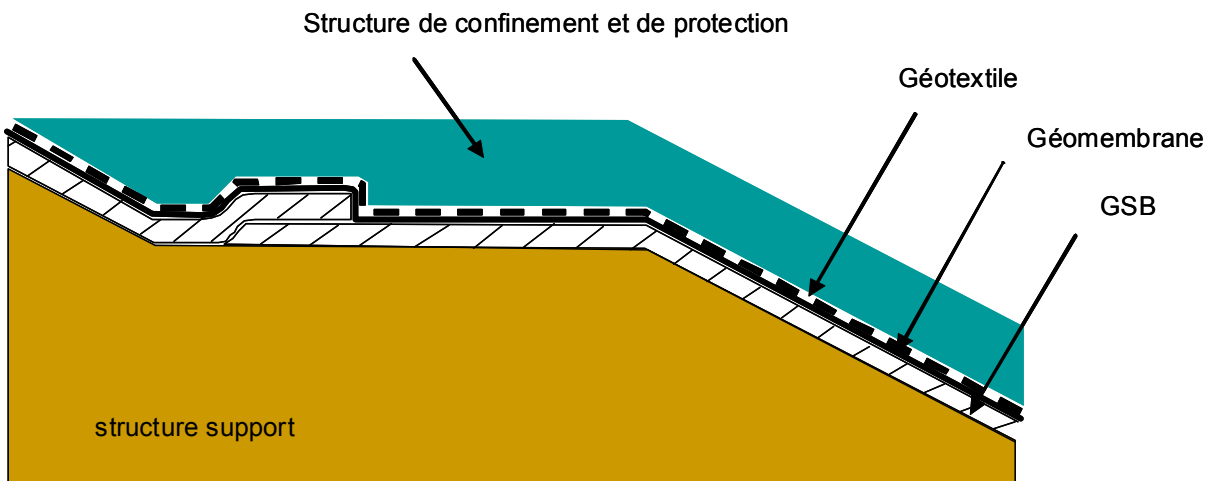


Figure 30 – Schéma de principe d'un ancrage intermédiaire par lestage avec joint

### Raccord horizontal en pied de talus

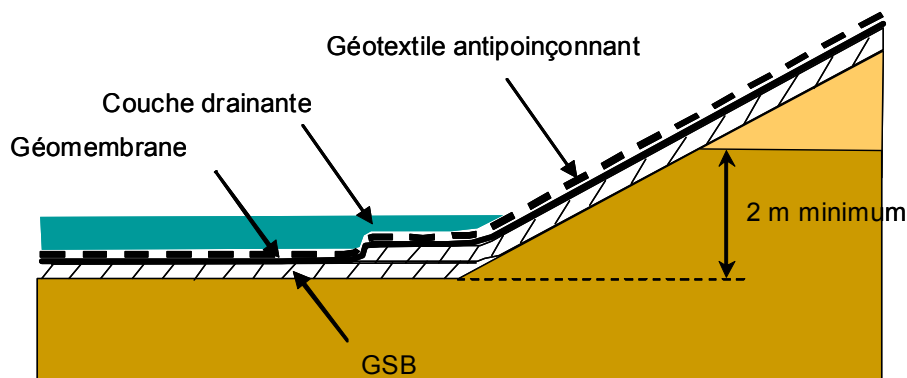


Figure 31 – Schéma de principe d'un raccord horizontal en pied de talus

Un raccord horizontal en pied de talus en pied doit être prévu pour garantir la continuité de l'étanchéité entre le GSB et l'horizon étanche à rejoindre. Il doit garantir le bon plaquage du GSB sur le sol support à la rupture de pente. Le lé inférieur du GSB doit rejoindre le pied de talus. Le lé supérieur recouvre le lé inférieur par tuilage. Cet ancrage est réalisé suivant les principes représentés par la figure 31.

#### 3.3.2.6 Raccordements aux ouvrages annexes

##### Contexte

Par expérience, le compactage des remblais autour des points singuliers est souvent insuffisant car difficile à réaliser.

Les zones de raccordement sont très souvent soumises à des tassements différentiels que le GSB peut absorber sans rupture sous réserve de dispositions constructives adéquates.

Ces ouvrages (arrivées ou évacuations des eaux, regards, galeries et murs, etc.) sont le plus souvent en béton, parfois en maçonnerie, en métal ou plastique.

## Principe général de raccordement

Pour les GSB, l'étanchéité au droit du raccordement est assurée par serrage d'un réglet métallique inoxydable ou d'un profilé inaltérable (métal ou plastique) (voir figure 32). Cette zone de fixation n'a pour but que de s'opposer à l'arrachement du GSB.

Lorsque la zone de fixation participe à l'étanchéité de l'ouvrage, celle-ci doit faire l'objet d'un traitement pour s'assurer de la continuité de l'étanchéité.

La zone de fixation doit être recouverte d'un minimum de 0,5m de sol.

Dans le cas de raccordement à une cheminée, on préconise la mise en place d'un renforcement d'étanchéité (ou jupette) (voir figures 33, 34 et 35). Pour garantir l'étanchéité au niveau du contact entre la cheminée et le GSB on peut avoir recours à un noyau d'argile sur et/ou sous le GSB sur une largeur minimale de 0,2m autour de la cheminée et sur une dizaine de centimètres d'épaisseur (voir Figure 36).

Au droit de ces ouvrages, on doit veiller à ce qu'il existe une surélévation de 0,2m sur 2m (pente 1/10) pour permettre l'évacuation de l'eau et compenser les tassements différentiels à ce niveau.

Un schéma de principe de raccordement à un fossé est présenté à la figure 37.



Figure 32 – Illustration de l'utilisation d'un réglet métallique

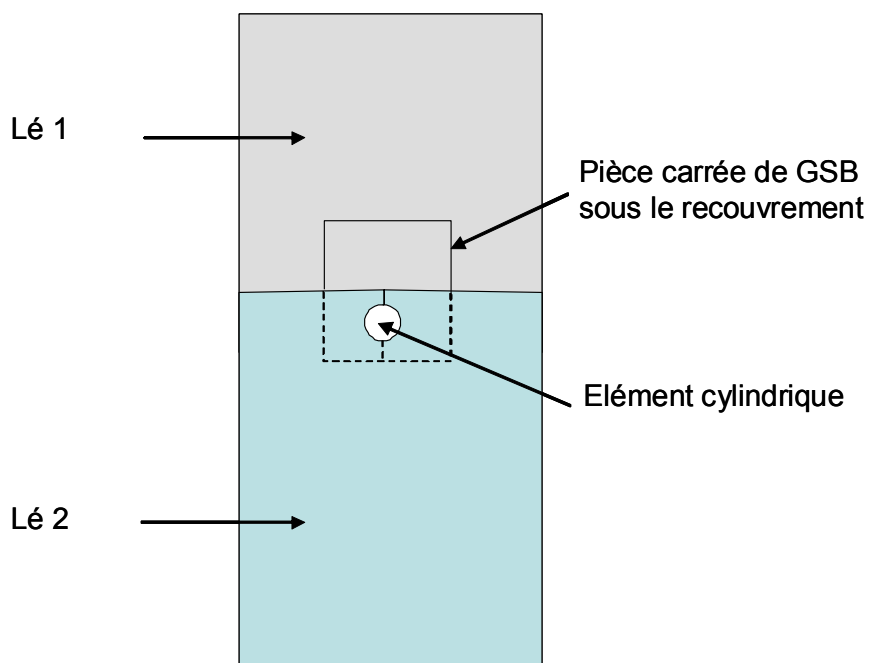


Figure 33 – Schéma de principe d'un recouvrement autour d'une traverse d'étanchéité

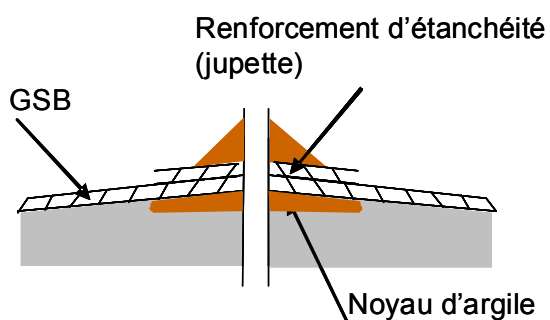


Figure 34 – Vue en coupe de la jonction à une traversée d'étanchéité



Figure 22 – Illustrations de recouvrements autour de traversées d'étanchéité



Figure 23 – Illustration de la mise en place de noyau d'argile en partie supérieure d'étanchéité autour d'une cheminée

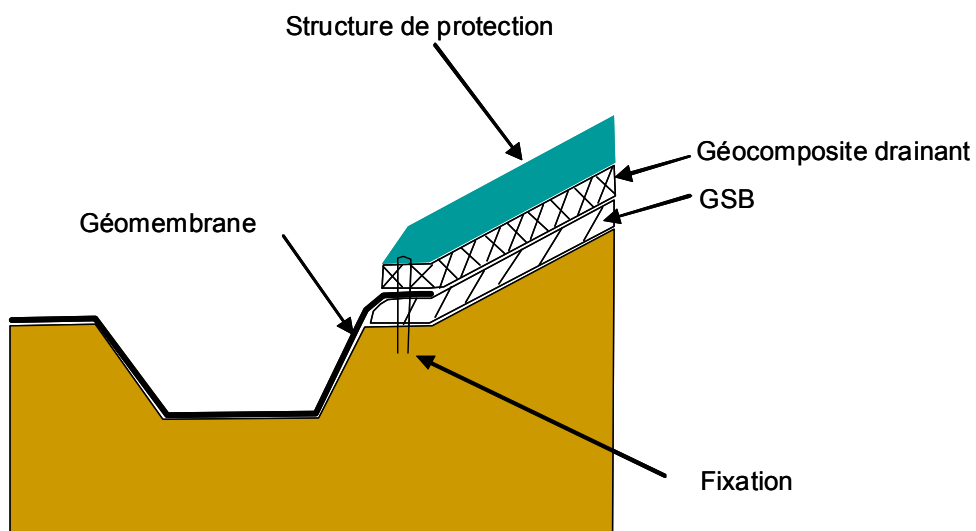


Figure 24 – Schéma de principe de raccordement à un fossé (exemple)

### 3.3.2.7 Réparations

Lorsque le GSB présente un défaut majeur visible ponctuel lié à la pose (percement, poinçonnement, ...), le défaut doit être réparé. Sur une surface plane, cela peut être réalisé au moyen d'une rustine de GSB. Cette rustine doit déborder de la zone endommagée d'au moins 0,5m de chaque côté. Avant d'installer la rustine on comblera le défaut par de la pâte de bentonite (voir figure 38).

La jointure sera effectuée selon les recommandations du fabricant.

Il sera accordé une attention particulière à la réparation sur talus. Ainsi, il faudra assurer le maintien de la rustine en tenant compte :

- des contraintes liées aux opérations de mise en œuvre ;
- des contraintes résultant du confinement et du remplissage.

Dans les cas où des doutes persistent sur l'efficacité de la rustine, on procédera au remplacement du lé.

La fixation de la rustine à l'aide de "fers en U", sur un GSB se situant sous une géomembrane est proscrite.

Lors de la phase de construction d'un bassin de stockage de lixiviats, le lé endommagé doit être enlevé et remplacé.

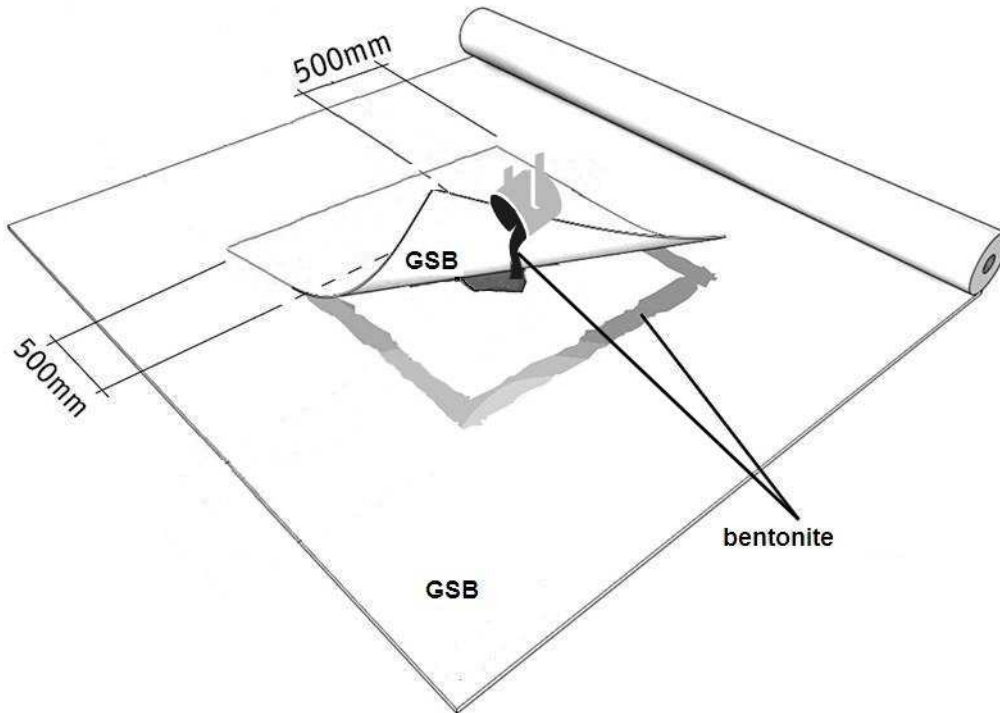


Figure 25 – Schéma de principe d'une réparation

### 3.3.3 Structure de confinement et de protection

#### 3.3.3.1 Recommandations générales relatives à la structure de confinement et de protection

Le confinement du GSB est indispensable pour que celui-ci puisse remplir sa fonction d'étanchéité avec la meilleure performance possible. Dans l'idéal, la structure de confinement et de protection est mise en œuvre à l'avancement de la pose du GSB.

Sur les talus elle sera mise en œuvre du bas vers le haut.

La stabilité de la structure de confinement et de protection peut alors nécessiter l'emploi de dispositifs particuliers (géosynthétiques ou autres techniques de renforcement des sols).

Dans le cas particulier des flancs où le GSB est recouvert par une géomembrane, si le confinement est différé, une étude spécifique doit justifier la faisabilité de cette pratique sous les aspects fonctionnels, de mise en œuvre et de

durabilité du DEG (exemple : prise en compte du gonflement libre, prise en compte de l'état hydrique du GSB pendant les phases transitoires de réalisation, nature du liquide hydratant le GSB, etc.).

### 3.3.3.2 Dispositions constructives

La structure de confinement et de protection doit être renforcée dans les zones de circulation (pendant la réalisation et l'exploitation de l'ouvrage).

Le matériau (graviers, limon, argile par exemple), exempt d'éléments agressifs, est approvisionné de manière à ce que les engins et les camions ne se déplacent que sur des surfaces préalablement confinées et protégées (voir figure 39).

Si l'apport des matériaux se fait par camions, ceux-ci ne peuvent évoluer, sauf dispositions particulières, sur les géosynthétiques déjà en place, qu'en prenant appui sur une piste d'épaisseur minimale de 1 m de matériaux déjà mis en place.

Les camions ne peuvent décharger que sur une partie déjà recouverte et ne doivent, sauf cas particulier d'accès, effectuer de préférence que des manœuvres rectilignes (voir figure 37) en marche arrière pour accéder à la zone de déchargement et en marche avant pour le retour à vide.



Figure 26 – Déplacement des engins sur une surface préalablement confinée et protégée.

Lors du déchargement du camion, un contrôle visuel permet de s'assurer qu'aucun élément agressif ou particulièrement saillant, risquant d'altérer les matériaux déjà en place, ne se trouve au sein du matériau.

Une attention toute particulière est accordée à la mise en œuvre des matériaux naturels sur les GSB afin d'en éviter la détérioration : sens de mise en œuvre conforme au sens de recouvrement des lés, emploi d'engins les moins lourds possibles, pas d'élément coupant ou perforant.

La circulation est réglementée par un plan de mise en œuvre de la structure de confinement et de protection.

Toutes les manœuvres brutales, ou de nature à altérer les GSB, sont prosrites (blocage des chenilles, appui de la lame sur les géosynthétiques, etc.).

La règle de l'art consiste à déposer les matériaux avec une pelle. Un engin de nivellement à chenilles (basse pression au sol) ne peut passer sur le matériau qu'une fois que son épaisseur est supérieure à 0,5m.

Au delà de cette valeur minimale, les matériaux de la structure de confinement et de protection peuvent être poussés.

Une épaisseur minimale moindre pourra être acceptée sous réserve d'une expérience similaire formalisée ou de la réalisation d'une planche d'essai.

### 3.3.4 Hydratation des GSB

Après leur mise en œuvre les GSB doivent être hydratés pour assurer la fonction étanchéité.



L'hydratation se fera naturellement par les précipitations ou par transfert d'humidité au contact de la structure support (quand ils sont recouverts par la géomembrane) ou de la structure de protection et de confinement.

La durée d'hydratation d'un GSB sous confinement dépend principalement :

- du mode d'hydratation ;
- de la géométrie de l'ouvrage ;
- de la contrainte de confinement appliquée.

Cette durée est généralement de l'ordre de :

- quelques jours par transfert au contact d'un sol humide (exemple : sable à 15% de teneur en eau) ;
- plusieurs semaines par transfert au contact d'un sol argileux.

### **3.4 DISPOSITIONS RELATIVES AUX ARRÊTS ET REPRISES DU CHANTIER**

En cas d'arrêt de la pose du GSB (intempéries, aléas de chantier, fin de semaine, etc.), certaines dispositions doivent être prises afin d'éviter toute détérioration du GSB :

- respecter les règles de terrassement concernant la mise hors eau des points sensibles du chantier (éviter les zones d'accumulation d'eau, ravinement, etc.) ;
- mettre en œuvre la structure de protection et de confinement sur l'ensemble du GSB en ne laissant découvertes que les extrémités des lés (sur au moins deux fois la largeur du recouvrement) ;
- protéger les extrémités des lés non recouvertes par la structure de confinement et à l'aide de films plastiques ; recouvrir les deux faces du GSB, après avoir éventuellement replié le GSB sur lui même afin de limiter l'humidification du produit ;
- protéger les rouleaux et les sacs de bentonite, entamés ou non, par un film plastique, les stocker conformément aux dispositions du paragraphe 3.3.2.2 ;
- s'assurer, à la reprise du chantier, que les parties de GSB en attente ont bien été protégées de l'humidité.

Les parties humidifiées non confinées et jugées non conformes seront soit coupées, enlevées et remplacées soit recouvertes par un second GSB.

# 4

## 4 CONTROLES

Les contrôles visés par ce chapitre ont pour but de s'assurer de l'adéquation entre la qualité des travaux réalisés et la qualité spécifiée par le maître d'œuvre. Ils peuvent être mis en œuvre par :

l'entreprise dans le cadre de son contrôle intérieur ;

le maître d'œuvre ou un organisme mandaté par celui-ci dans le cadre du contrôle extérieur.

### 4.1 DOMAINE DES CONTROLES

Les contrôles doivent s'exercer sur :

- la conception du projet, vérification de la performance et de la faisabilité sur le chantier ;
- la documentation en amont des travaux ;
- la réception des différentes phases de travaux intermédiaires ou initiales ;
- les produits à réception ;
- la mise en œuvre des produits (planches d'essais, essais, examens visuels, etc.).

La documentation établie en amont des travaux ou pendant le suivi des travaux relève du dispositif d'assurance de la qualité. L'examen de la documentation est à ce titre traité au chapitre 5 du fascicule.

Le DEG étant constitué des structures support, d'étanchéité et de confinement et protection, les contrôles s'appliquent à ces trois structures ainsi qu'aux ouvrages ou parties d'ouvrages.

Ils s'appliquent aussi bien au fond, aux flancs, qu'à la couverture.

Les tableaux 6 à 8 précisent les types de contrôle qui peuvent être mis en œuvre. Il appartient au maître d'œuvre de définir les exigences concernant :

- la liste des contrôles à réaliser ;
- leur fréquence ;
- les moyens retenus ;
- l'entité devant les effectuer.

Dans les tableaux ci-après, les contrôles suivis d'un (A) sont Applicables et les contrôles suivis d'un (N) sont Nécessaires avec les définitions suivantes :

- “Nécessaire (N)” : Le contrôle doit être réalisé dans tous les cas et doit être spécifié dans le CCTP. Cette spécification peut se traduire par :
  - une valeur quantifiée (seuil) et mesurable ;
  - une exigence technique éventuellement validée par une planche d'essais.
- “Applicable (A)” : Le contrôle peut être réalisé dans certains cas. Quand le concepteur juge le contrôle nécessaire, il doit être spécifié suivant le principe défini pour les contrôles “nécessaires”.

Lorsqu'un contrôle s'appuie sur un essai, le lecteur pourra se reporter au paragraphe 3.2.4.

Tableau 6 – Structure support

Réception de la structure existante	Contrôles de réception des produits* avant mise en œuvre	Contrôles de la mise en œuvre des produits*	Contrôles de réception de la structure
<ul style="list-style-type: none"> <li>• réception de la couche de forme (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ géométrie : nivellement, planimétrie, topographie, pentes</li> <li>○ végétation</li> <li>○ accessibilité du chemin</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• contrôle visuel (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ nature des matériaux naturels (pierres, racines, granulométrie, angularité, propreté)</li> </ul> </li> <li>• caractéristique des matériaux naturels (A)               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ granulométrie</li> <li>○ matériaux naturels</li> <li>○ nature pétrographique (teneur en carbonates)</li> </ul> </li> <li>• réception des produits manufacturés (voir paragraphe 4.3 pour la fréquence des contrôles) (N)               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ vérification de la conformité du produit avec le bon de commande</li> <li>○ vérification du marquage CE</li> <li>○ certification ASQUAL si existante</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• densité sèche (A)</li> <li>• épaisseur des couches (N)</li> <li>• points singuliers : puits, drains, canalisations (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ dimensions</li> <li>○ emplacement</li> </ul> </li> <li>• ancrages (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ géométrie</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• géométrie : nivellement, planéité, topographie, pentes, tranchées d'ancrage (N)</li> <li>• portance, déformabilité (A)</li> <li>• Contrôle visuel (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ état de surface</li> <li>○ absence d'angle vif</li> </ul> </li> <li>• perméabilité (A)**</li> </ul>

\* Le terme “produits” couvre les produits naturels et les produits manufacturés.

\*\* Ce contrôle est nécessaire lorsque la structure support a un rôle d'étanchéité passive.

Tableau 7 – Structure d'étanchéité

Réception de la structure existante	Contrôles de réception des produits* avant mise en œuvre	Contrôles de la mise en œuvre des produits*	Contrôles de réception de la structure
<ul style="list-style-type: none"> <li>• réception de la structure support :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ géométrie: nivellement, planimétrie, topographie, pentes, tranchées d'ancrage (N)</li> <li>○ portance, déformabilité (A)</li> </ul> </li> <li>• contrôle visuel (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ état de surface</li> <li>○ - absence d'angle vif</li> </ul> </li> <li>• perméabilité (A)**</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• contrôle visuel (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ conditionnement</li> <li>○ stockage</li> </ul> </li> <li>• réception des produits (étiquettes) (N)</li> <li>• Fiches de contrôle de production usine (N) (voir Annexe C)</li> <li>• étiquetage et marquage CE (N)</li> <li>• essais d'identification (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ masse surfacique, épaisseur, indice de gonflement, teneur en CaCO<sub>3</sub>, CEC</li> </ul> </li> <li>• essais d'identification (A) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ signature isotopique</li> </ul> </li> <li>• essais de performance (A) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ mesure de flux, conductivité hydraulique (eau et gaz),</li> <li>○ mesure de flux aux recouvrements (eau et gaz),</li> </ul> </li> <li>• comportement en traction, cisaillement interne, pelage (A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• conditions de manutention (N)</li> <li>• conditions climatiques à la mise en œuvre (N)</li> <li>• assemblages (N) (dimensions et produits d'apport, joints et points singuliers, propreté)</li> <li>• respect du plan de pose (sens de recouvrement, sens de pose, etc.) (N)</li> <li>• raccords (ancrages, drains) (N)</li> <li>• lestage provisoire, fixations temporaires (A)</li> <li>• contrôle visuel de l'état de surface de la structure d'étanchéité (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ déchirure</li> <li>○ décollement</li> <li>○ propreté</li> <li>○ plis</li> <li>○ points singuliers, contrôle visuel</li> <li>○ dimensions</li> <li>○ emplacement</li> <li>○ dispositions constructives</li> </ul> </li> <li>• Respect de la procédure de mise en œuvre (N)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• contrôle visuel de l'état de surface de la structure d'étanchéité (N) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ déchirure</li> <li>○ décollement</li> <li>○ propreté</li> <li>○ plis</li> </ul> </li> <li>• assemblages (N) (dimensions et produits d'apport, joints et points singuliers, propreté)</li> <li>• état des raccords (ancrages, ouvrages) (N)</li> <li>• points singuliers, contrôle visuel (N)               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ dimensions</li> <li>○ emplacement</li> <li>○ dispositions constructives</li> </ul> </li> <li>• Plan de récolement avec correspondances numéros de rouleaux (N)</li> </ul>

\*Le terme "produits" couvre les produits naturels et les produits manufacturés

\*\* Ce contrôle est nécessaire lorsque la structure support a un rôle d'étanchéité passive

Tableau 8 – Structure de confinement et de protection

Réception de la structure existante	Contrôles de réception des produits* avant mise en œuvre	Contrôles de la mise en œuvre des produits*	Contrôles de réception de la structure
<ul style="list-style-type: none"> <li>• réception de la structure d'étanchéité (N)</li> <li>• planche d'essais (A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• contrôle visuel (N) :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ nature des matériaux (pierres, racines, granulométrie, angularité, propreté)</li> </ul> </li> <li>• caractéristiques des matériaux (A) :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ granulométrie</li> <li>○ matériaux naturels (A) : nature pétrographique (teneur en carbonates)</li> <li>○ nature minéralogique</li> </ul> </li> <li>• compatibilité chimique des matériaux naturels (N) :</li> <li>• vérification de la conformité du produit avec le bon de commande, vérification du marquage CE, certification ASQUAL si existante (N)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• densité sèche (A)</li> <li>• épaisseur des couches (N)</li> <li>• teneur en eau (A)</li> <li>• géométrie: nivellement, planimétrie, topographie (N)</li> <li>• pentes (N) :</li> <li>• points singuliers, (puits, drains) (N)</li> <li>• drains, canalisations, etc.), contrôle visuel (N) :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ dispositions constructives</li> <li>○ respect de la procédure de mise en œuvre (circulation des engins, sens de mise en œuvre, etc.)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• réception de la structure de confinement et de protection:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ géométrie : (N) dont épaisseur finale de la structure de confinement</li> <li>○ portance, déformabilité (A)</li> </ul> </li> </ul>

\* Le terme "produits" couvre les produits naturels et les produits manufacturés.

## 4.2 RECOMMANDATIONS GENERALES RELATIVES AUX CONTROLES D'UN DEG

Les recommandations de contrôle qui suivent sont décrites dans l'ordre du déroulement d'un chantier type d'installation des géosynthétiques bentonitiques. On détaille les étapes suivantes :

- organisation du chantier ;
- stockage et manutention des produits ;
- réception des matériaux et matériels sur le chantier ;
- planches d'essais (éventuelles) ;
- mise en œuvre et réception de la structure support ;
- plan de calepinage des géosynthétiques (ou plan de pose) ;

- mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques, élaboration d'un plan de récolement ;
- mise en œuvre de la structure de protection et de confinement.

La fréquence des contrôles des différentes structures du DEG (structure support, structure d'étanchéité, structure de confinement et de protection) dépend :

- de la durée de vie de l'ouvrage ;
- du risque que pourrait entraîner un dysfonctionnement de l'ouvrage ou de l'une des structures précitées ;
- des quantités de matériaux mises en œuvre (matériaux naturels ou manufacturés) ;
- de l'homogénéité des matériaux constitutifs des structures supports, de confinement et de protection.

#### 4.2.1 Contrôles de l'organisation du chantier

Il s'agit de s'assurer, par le contrôle des plans et notes d'organisation, que les phases successives des travaux sont cohérentes. En particulier les points suivants sont à examiner :

- circulation des engins de chantier ;
- implantation des aires de stockage des produits ;
- déploiement du GSB, existence des plans de pose indiquant l'ordre et le sens de pose des différents lés des géosynthétiques bentonitiques ;
- qualification du personnel en charge de la mise en œuvre du DEG ; le GSB doit être posé par des entreprises de pose disposant de personnel formé, l'assistance technique du fournisseur est recommandée.

#### 4.2.2 Contrôles des zones de stockage et de manutention des produits

Le respect des règles de stockage et de manutention des géosynthétiques bentonitiques est déterminant dans l'obtention de la qualité finale des travaux. Les contrôles associés à cette étape sont essentiels. Ils portent notamment sur :

- la qualité des zones de stockage :

- aires planes, accessibles, drainées, portantes et exemptes de tout élément agressif ;
- stockage à plat, empilement de quatre niveaux au maximum ;

permettant la protection des matériaux contre, la pluie et les UV.

- la qualité de la manutention des rouleaux qui doit garantir :

- l'absence de flexion et de torsion des rouleaux ;
- la disponibilité des engins adaptés au transport comme au déroulement des GSB.

Les opérations de manutention doivent être limitées au strict nécessaire pour éviter la détérioration de la couche de pose.

#### 4.2.3 Contrôles de réception des matériaux et matériels sur le chantier

Lorsque les contrôles font intervenir des matériels de mesure (balance), ceux-ci sont contrôlés à la réception sur chantier :

- étalonnage ;
- adaptation à la gamme de mesure.

A la réception sur site des matériaux, les contrôles suivants sont réalisés :

- conditionnement étanche et non détérioré ;
- examen de l'étiquetage (produits certifiés, marquage CE, état des contrôles de fabrication en usine) ;
- conformité des matériaux naturels et des GSB aux spécifications (fréquence des contrôles de réception associés aux GSB : voir § 4.3), Dans le cas où la conformité doit être vérifiée en sortie d'usine pour des questions de délais, une procédure particulière doit être mise en œuvre.

Les étiquettes d'identification des produits seront conservées et tenues à disposition du maître d'œuvre ainsi que les résultats des essais de conformité (voir § 5).

#### 4.2.4 Planches d'essais

En cas d'absence d'expériences formalisées dans des conditions similaires de mise en œuvre, des planches d'essais pourront être réalisées.

Elles permettent de vérifier les paramètres de mise en œuvre (compactage, principe de pose, phase de travaux, etc.).

Une planche d'essai n'a pas pour but de guider ou de valider les choix de conception. Ces derniers peuvent l'être par des essais ou épreuves de convenance qui doivent être réalisés lors de la phase de conception.

Les planches d'essais peuvent concerner la mise en œuvre de la structure support, de la structure d'étanchéité, de la structure de confinement et/ou de protection ainsi que le traitement des points singuliers.

Leur superficie doit permettre l'utilisation industrielle des matériels de chantier.

Compte tenu du coût des planches d'essais, il est essentiel que celles-ci soit définies par un programme et que les contrôles réalisés soient enregistrés dans un compte-rendu.

Elles pourront constituer une partie intégrante de l'ouvrage et ne seront pas systématiquement démontées sous réserve du bon comportement de la structure.

#### 4.2.5 Contrôles associés à la mise en œuvre et réception de la structure support

Il faut s'assurer que les contrôles spécifiques à la réception de la couche support pour assurer le fonctionnement de celle-ci ont été effectués (par ex. épaisseur, teneur en eau, densité, conductivité hydraulique...).

Les contrôles suivants doivent être effectués immédiatement avant la pose du GSB pour garantir que ce dernier remplisse sa fonction dans l'ouvrage :

- absence d'ornières (ou limitation de la profondeur et largeur) c'est à dire, déviations verticales inférieures à 2 cm sur une distance de 1 m et traces laissées par les engins inférieures à 5 mm en fond ; en talus on peut tolérer des défauts de surface plus importants de quelques centimètres ; pour l'éventuelle utilisation d'autres matériaux complémentaires pour combler des défauts se référer au chapitre 3.3.1.3.
- absence de zone de rétention d'eau même gelée ;
- portance conforme aux exigences spécifiées ou implicites ;
- absence d'élément susceptible d'endommager le GSB ;
- respect de la géométrie du projet (nivellement, pentes, topographie, planimétrie).

La réception de la structure support fait l'objet d'un procès verbal formalisé (PV).

#### 4.2.6 Contrôles du plan de pose (ou de calepinage) des géosynthétiques bentonitiques

L'applicateur doit fournir un plan de pose du GSB. Les contrôles du plan de pose portent notamment sur :

- la localisation de l'assemblage des différents lés en tenant compte de la géométrie réelle de l'ouvrage ;
- l'identification des pentes ;
- le repérage des lés ;
- les dimensions et sens des recouvrements, définition des types de joint ;
- l'implantation des points singuliers (puisards, massifs, etc.) et découpes des lés associés,
- la cohérence du plan de pose avec le plan de phasage des travaux.

#### 4.2.7 Contrôles associés à la mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques

Lors de la mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques les contrôles concernent :

- les conditions climatiques (vent, pluie, température) ;
- la réalisation préalable et la conformité dimensionnelle des tranchées d'ancrage ;
- la préparation des raccordements aux structures rigides (puits, drains, canalisations) ;
- le respect des phasages de travaux (notamment recouvrement à l'avancement par la géomembrane et confinement) ;
- le positionnement des géosynthétiques conformément au plan de pose (un plan de récolement en fin de chantier précise les adaptations réalisées avec l'accord du maître d'œuvre). Ce contrôle porte notamment sur les largeurs minimales de recouvrement et le respect des exigences de pose et notamment en talus (suivant la ligne de plus grande pente, sens de déploiement) ;
- le lestage des géosynthétiques en place (géotextile de renforcement, séparation, géocomposite drainant) ;
- la réalisation des assemblages (largeur, nature et quantité des produits d'apport éventuels, absence de corps étrangers et de plis), ce contrôle est réalisé sur la totalité du linéaire de recouvrement (voir paragraphe 3.3 pour les conditions de mise en œuvre) ;
- le raccordement aux points singuliers ;
- les réparations éventuelles.

#### 4.2.8 Contrôles associés à la mise en œuvre de la structure de protection et de confinement

La mise en œuvre de la structure de confinement et de protection ne doit pas endommager la structure d'étanchéité. En particulier, aucun engin ne doit rouler directement sur le GSB (voir paragraphe 3.3). Il est nécessaire de contrôler les points suivants :

- granulométrie et nature des matériaux ;
- épaisseur des couches (ne pas utiliser d'objet poinçonnant) ;
- densité sèche (éventuellement) ;
- respect des recommandations issues de la planche d'essais éventuelle ;
- respect des zones de circulation des engins de chantier (épaisseur minimale de remblai permettant la circulation des engins sur les géosynthétiques bentonitiques en place sans endommagement) (voir paragraphe 3.3.2.4 sur la mise en œuvre) ;



- respect des procédures de déchargement des camions (chute de blocs, virage, freinage, etc.) (voir paragraphe 3.3.3) ;
- respect du sens de mise en œuvre des matériaux de la structure de protection et de confinement (sens de pose des lés, sens de pose des structures drainantes).

Ces contrôles préconisés ne doivent pas endommager la structure d'étanchéité.

#### 4.2.9 Contrôles du plan de récolement

Un plan de récolement est tenu à jour durant la réalisation des travaux. Les contrôles associés portent sur :

- la mise à jour effective et régulière du plan de récolement ;
- le contenu du plan de récolement tel que précisé au paragraphe 3.3.2.3.

### 4.3 FREQUENCE DES CONTROLES DE RECEPTION DES CARACTERISTIQUES DES GSB

Le nombre des contrôles de réception des caractéristiques spécifiées des géosynthétiques bentonitiques dépend :

- de la caractéristique contrôlée ;
- de la quantité de GSB mise en œuvre ;
- du nombre d'approvisionnements ou de sources d'approvisionnements de GSB.

Ils relèvent du contrôle externe.

Le tableau 9 définit le nombre minimum de contrôles de réception préconisés pour les principales caractéristiques des GSB. Ces contrôles sont à effectuer sur les matériaux prélevés sur chantier.

Le maître d'œuvre définit les exigences minimales relatives à la nature et aux fréquences des contrôles de réception des matériaux naturels ou manufacturés.

Tableau 9 – caractéristiques à contrôler et fréquences de contrôle pour la fonction étanchéité

Caractéristiques à contrôler (contrôle externe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessaires                         <ul style="list-style-type: none"> <li>○ masse surfacique</li> <li>○ épaisseur</li> <li>○ CEC</li> <li>○ teneur en CaCO<sub>3</sub></li> <li>○ indice de gonflement</li> <li>○ essai de conformité et mesure de flux à l'eau, conductivité hydraulique</li> </ul> </li> </ul>	1 minimum par lot livré et par surface ≤ 5000 m <sup>2</sup>  ○ 1 minimum et nombre à définir en fonction des résultats précédents
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Applicables                         <ul style="list-style-type: none"> <li>○ signature isotopique</li> <li>○ essai de conformité mesure de flux (eau et gaz), conductivité hydraulique, mesure de flux aux recouvrements</li> <li>○ comportement en traction, cisaillement interne, pelage</li> </ul> </li> </ul>	○ 1 par lot de production usine et par chantier  ○ 1 minimum et nombre à définir en fonction des résultats précédents  ○ 1 minimum  ○ 1 par tranche de 5000m <sup>2</sup>



## 5 CONTENU DU PLAN D'ASSURANCE QUALITE (PAQ)

Les Plans d'Assurance Qualité (PAQ) contiennent au minimum les informations suivantes :

- identification et consistance des travaux ;
- organisation de l'entreprise :
  - organigramme nominatif ;
  - description des fonctions du personnel ;
  - schéma décisionnel ;
  - organisation du contrôle intérieur.
- moyens :
  - qualification du personnel ;
  - qualité des matériaux mis en œuvre ;
  - qualité des matériels d'exécution et de contrôle.
- exécution des travaux :
  - méthodes de mise en œuvre ;
  - description et fréquence des contrôles ;
  - documents de suivi ;
  - traitement des non conformités ;
- réception des travaux :
  - procédures de réception.
- archivage des documents :
  - procédures de stockage, manutention ;
  - mise en œuvre, contrôle des produits - PV de réception des produits ;

- fiches d'habilitation du personnel ;
- fiches d'identification du matériel de contrôle ;
- PV de la ou des planches d'essais ;
- fiches des spécifications techniques des matériaux.

## **5.1 CONTENU DU SCHEMA DIRECTEUR DE LA QUALITE (SDQ)**

Le schéma directeur de la qualité réunit les PAQ des différents intervenants. Il assure la cohérence entre les différents PAQ et garantit la continuité de l'assurance de la qualité aux interfaces entre intervenants.

Il contient au minimum les points suivants :

- les Plans d'Assurance Qualité des entreprises et de leurs fournisseurs ;
- la description de l'organisation du contrôle extérieur ;
- le traitement des anomalies et des non conformités ;
- l'organisation des interfaces entre intervenants ;
- la définition du planning général des travaux ;
- l'identification des chemins critiques ;
- le positionnement des points de convocation et des points d'arrêt ;
- les spécifications des produits.

## **5.2 DOCUMENTS D'ASSURANCE QUALITE**

Les documents d'assurance qualité établis pour un chantier de mise en œuvre d'un DEG sont indiqués dans le tableau 10. Certains de ces documents peuvent être regroupés. En outre, la liste ci-après est donnée à titre indicatif seulement dans le tableau 10.

Tableau 10 –Documents d'assurance qualité

Phases	Intervenants			
	Maître d'ouvrage	Maître d'oeuvre	Entreprises	Contrôle extérieur
cahier des charges	expression du besoin : o qualité d'usage (1) o conditions d'exploitation			
conception		définition de la qualité requise (2)		validation de la qualité requise
dossier de consultation des entreprises		définition du référentiel d'assurance de la qualité exigences minimales pour la qualité des moyens et contrôles		
offres			réponses aux exigences de l'assurance de la qualité (SOPAQ)	
préparation du chantier		rédaction du SDQ	rédaction du PAQ réalisation des documents d'exécution	
Réalisation du contrôle des produits utilisés		visa les résultats du contrôle	réalise les contrôles	visa les résultats du contrôle
travaux		visa des documents d'exécution et du PAQ vérification de l'application du système qualité (suivis, contrôles extérieurs, récolement, réception, etc.)	application du système qualité (PAQ)	visa du PAQ réalisation des contrôles extérieurs
Réception	réception	organisation des opérations préalables à la réception	Elaboration du dossier d'ouvrage exécuté	Elaboration d'un dossier de conformité par rapport à l'arrêté préfectoral si demandé

SDQ : Schéma Directeur de la Qualité: ce document réunit notamment les PAQ des différents intervenants.

SOPAQ : Schéma Organisationnel du Plan Assurance Qualité.

PAQ : Plan d'Assurance Qualité.

(1) la qualité d'usage est définie par les dispositions techniques qu'impose le maître d'ouvrage pour définir l'emploi de l'ouvrage (ex: finalité technique d'exploitation, etc.)

(2) la qualité requise est la déclinaison des dispositions explicites ou implicites résultant de la qualité d'usage spécifiée et se traduisant notamment par les exigences fonctionnelles de l'ouvrage (exemples : respect de la réglementation, spécifications en termes de performances de l'ouvrage et de ses constituants, etc.)

## Références bibliographiques

AFNOR (2008). XP P 84-700. Géosynthétiques bentonitiques – généralités – Définitions.

AFNOR (2006). NF EN ISO 10318. Géosynthétiques – Termes et définitions.

AFNOR (1998). NF P 84-500. Géomembranes – Terminologie

BRGM - Ademe (2001). Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés. ISBN 2-86817-622-4, 167 p.

Guyonnet, D., Gaucher, E., Gaboriau, H., Pons, C.-H. Clinard, C., Norotte, V. et Didier, G. (2005). Geosynthetic clay liner interaction with leachate : correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131(6), 740-749.

Journal Officiel du Conseil de l'Union Européenne (1999). Directive 1999/31/CE du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets. JO n°L182 du 16 juillet 1999, 1-19.

Journal Officiel de la République Française (1997). Arrêté du 9 septembre 1997. Décharges d'ordures ménagères – Décharges existantes et nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés.

MEDD (2002). Guide de recommandations, à l'usage des tiers experts, pour l'évaluation de l'équivalence en étanchéité de site de stockage de déchets. Guide of recommendations, for third party experts, relative to the assessment of equivalence in landfill barriers. Edited by the French Ministry of the Environment, Paris, France, 20 p.

MEEDDM (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire) (2009). Guide de recommandations pour l'évaluation de l'équivalence en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets, Version 2, MEEDDM, Paris, France, 45 p.

Koerner, R.M. et Koerner, G.R. (2005a). GRI White Paper#5 – In-situ separation of GCL panels beneath exposed geomembranes. Geosynthetic Institute, Folsom, PA, April, 21p.

Koerner, R.M. et Koerner, G.R. (2005b). In-situ separation of GCL panels beneath exposed geomembranes. *Geotechnical Fabrics Report*, June-July, 34-39.

Thiel, R. et Richardson, G. (2005). Concern for GCL Shrinkage when Installed on Slopes. Proceedings of the 18th Annual GRI Conference at Geofrontiers, paper 2.31, GRI Publications, Folsom, PA, 7p.

# Annexes

## **Annexe A : abréviations**

APD : avant projet détaillé

APS : avant projet sommaire

ASQUAL : Association Qualité

ASTM : American Society for Testing and Materials

CCTP : Cahier des Clauses techniques Particulières

CEC : Capacité d'Echange Cationique

CFG : Comité Français des Géosynthétiques

DEG : Dispositif d'Etanchéité par Géosynthétiques

DIN : Deutsches Institut für Normung

EN : European Norm

GSB : Géosynthétiques Bentonitiques

GMB : géomembranes

GTX : Géotextiles

ISD : Installation de Stockage de Déchets

ISO : International Standard Organization

JOCE : Journal Officiel de la Communauté Européenne

JORF : Journal Officiel de la République Française

NF : Norme Française

PAQ : Plan d'Assurance Qualité

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PV : Procès Verbal

SDQ : Schéma Directeur de la Qualité

SOPAQ : Schéma Organisationnel du Plan d'Assurance Qualité

UV : Ultra Violets (rayons)



## Annexe B : Compléments sur la bentonite

### I – Définitions du terme "argile"

D'après le petit Robert (1983) "ce terme provient du latin "*argila*", ce qui signifie une terre provenant surtout de la décomposition des feldspaths, avide d'eau, imperméable et plastique, dite terre glaise ou terre à potier. La définition du thesaurus de l'Encyclopaedia Universalis (1988) est plus précise : "ce terme devrait être réservé au seul minéral, à structure en feuillets, alumino-silicate de magnésium et de potassium, parfois associé à d'autres ions métalliques. Dans le langage courant, on désigne le plus souvent par argile toute roche sédimentaire contenant des particules de diamètre inférieur à deux microns".

Ainsi il convient de distinguer les deux sens : l'un granulométrique, l'autre minéralogique. Dans un échantillon de sol, les particules ont des tailles allant de quelques millimètres jusqu'au micromètre, voire à la dizaine de nanomètres. Le terme argile a d'abord un sens granulométrique : il désigne les particules les plus fines d'un matériau. La limite de deux microns (0,002 mm) fixée par l'Association Internationale de la Science du Sol est assez universellement acceptée.

La surface volumique des particules est inversement proportionnelle à leur diamètre, ce qui explique la réactivité chimique et physique extrêmement importante des argiles par rapport au squelette interne. Cette fraction granulométrique possède en outre, la propriété de se disperser dans l'eau, d'où ses propriétés colloïdales (Van Olphen, 1977). Ces dernières sont avant tout liées à la nature minéralogique des particules.

Dans cette fraction granulométrique se retrouvent les minéraux argileux, deuxième sens du terme argile. Considérés comme des gels amorphes, c'est grâce à la diffraction des rayons X que l'on a pu démontrer leur caractère cristallin et la fine hiérarchie de leur structure. C'est cet aspect qui sera le plus développé dans le paragraphe suivant, car il conditionne les comportements chimiques, physiques et mécaniques des matériaux argileux.

### II - Généralités sur les argiles

Les argiles sont des minéraux appartenant au groupe des phyllosilicates hydratés. Elles se présentent en très petits cristaux (en plaquettes hexagonales ou parfois en fibres) et sont caractérisées par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques (couche T de  $(\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2^{6-})$ ) et de couches octaédriques (couches O à base de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ou  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

Les feuillets composant les argiles sont de type T-O ou T-O-T (figure 1) : entre eux se placent divers cations K, Na, Ca. Leurs épaisseurs sont selon les cas, de 0,7 nm, 1 nm, 1,2 nm, 1,4 nm ; ces valeurs peuvent varier expérimentalement (gonflement par traitement au glycérol, diminution par perte d'eau au chauffage, ...).

En raison de leur faible taille, les particules d'argiles présentent une surface spécifique très importante, accessible aux fluides polaires, et pouvant atteindre  $700 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  pour les montmorillonites.

En ce qui concerne la perméabilité d'une argile, celle-ci dépend d'un ensemble de phénomènes différents par rapport à la perméabilité d'un sable ou d'un gravier. Les pertes de charges dans une argile sont dues à d'autres causes que le frottement telles que :

- les forces d'interactions moléculaires avec les fluides polaires ;
- l'échange d'ions entre fluides et solides, d'où une viscosité qui peut varier durant l'écoulement ;
- un écoulement inverse dû à la concentration élevée en ions dans les pores d'argiles où il peut se créer un phénomène d'osmose.

La capacité d'échange d'une argile dépend de sa constitution chimique ou de sa granulométrie. Dans leur structure, pour compenser la charge d'un cation, plusieurs atomes d'une surface peuvent intervenir et ainsi former des demi et des tiers de liaisons covalentes. La charge des cations est très concentrée et peut exercer sur les molécules du lixiviat une polarisation. Le décollement des cations peut s'en trouver facilité. En général, la fixation et l'échange de cations peuvent avoir différentes causes :

- les liaisons non satisfaites dues aux charges négatives situées sur les bords des cristaux tétraédriques ou octaédriques ;

- le déséquilibre des charges dans les structures élémentaires résultant des substitutions de l'aluminium par du  $Mg^{2+}$  dans les tétraèdres et les octaèdres de base ;
- les hydrogènes des hydroxydes superficiels des minéraux qui peuvent être remplacés par des cations libres.

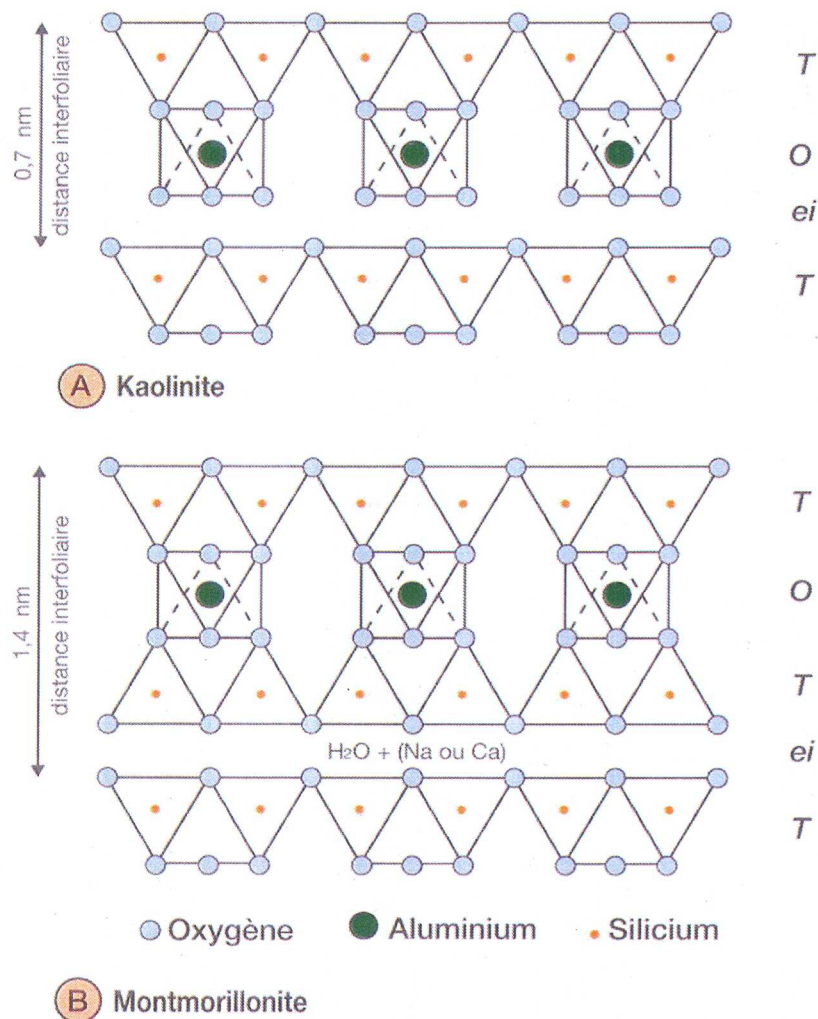


Figure 1 : Représentation schématique des structures des minéraux argileux : O - couche d'octaèdres d'atomes d'oxygène avec un aluminium au centre, T - couche de tétraèdres d'atomes d'oxygène avec un silicium au centre, ei - espace interfoliaire où peuvent se placer divers cations.

### III - Les montmorillonites

La montmorillonite fut décrite pour la première fois à Montmorillon dans le département français de la Vienne en 1847. C'est une argile au toucher onctueux qui caractérise les milieux sédimentaires riches en bases (surtout Mg) et de pH légèrement ou fortement alcalin. Elle est généralement abondante dans des milieux relativement confinés, par exemple bas de pentes en milieu sec à saisons contrastées (Chamayou et Legros, 1989).

Les montmorillonites au sens strict appartiennent au groupe des smectites (on a souvent tendance à confondre les montmorillonites au sens large, avec les smectites). Ce groupe contient principalement la montmorillonite, la beidellite, la nontronite dioctaédrique, la saponite, l'hectorite. Etymologiquement le mot smectite vient du grec "smectos" qui signifie "je nettoie", ceci en, relation avec les propriétés dégraissantes de ces minéraux (Chamayou & Legros, 1989). Les feuillets sont de petites tailles, sans contours réguliers et peu liés entre eux. De l'eau, de la matière organique et divers produits peuvent pénétrer dans les espaces interfoliaires. La distance entre deux feuillets peut varier entre 1 nm et 1,75 nm. C'est cette caractéristique qui donne aux smectites des propriétés d'absorption utilisées dans l'industrie et les sciences du sol.

Les ingénieurs utilisent souvent le terme de Bentonite qui est du point de vue technique, utilisé pour tout matériau argileux contenant suffisamment de smectite pour qu'elle lui impose ses propriétés physiques. On estime que pour que le matériau soit nommé bentonite, que la montmorillonite doit être présente de manière significative (de l'ordre de 60 %)

En fait, les argiles de la famille des smectites se distinguent par certaines caractéristiques :

- leurs propriétés de gonflement qui permet le remplissage des fissures existantes ou qui se développeraient a posteriori ;
- une très faible perméabilité à long terme ;
- des propriétés d'échange et d'adsorption aptes à retenir préférentiellement certains polluants.

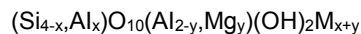
Mais pour que ces caractéristiques soient conservées, il faut s'assurer de l'effet de solutions complexes sur ces structures. Bien que de nombreuses propriétés soient connues, le comportement de tels matériaux en contact avec des lixiviats et cela pendant une grande période est encore mal connu.

Les mécanismes d'hydratation et de gonflement font généralement référence à l'insertion d'eau entre les feuillets. Déjà Mering, en 1946, montrait pour des montmorillonites calciques que 90% de leur gonflement est dû au remplissage d'espaces plus grands que les espaces strictement interfoliaires. En fait, le mécanisme d'hydratation de ces argiles fait intervenir des niveaux d'organisation plus macroscopiques, en particulier des espaces intercrystallites ainsi que des espaces interagrégats de cristallites (Tessier, 1984). Pour la plupart des argiles, l'interprétation de leur hydratation ne peut être possible qu'en tenant compte de l'échelle du feuillet, donc nanométrique, jusqu'à une échelle macroscopique (Tessier, 1997 ; Tessier et al., 1992).

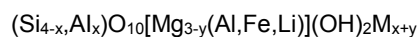
### III.1. Les feuillets

Les smectites sont des argiles à trois couches (T-O-T) qui se présentent sous un certain nombre de variétés formant deux séries :

une série dioctaédrique :

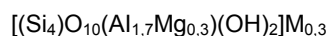


une série trioctaédrique :



(M est un cation compensateur)

La montmorillonite est une argile dioctaédrique dans laquelle  $X=0$ , c'est-à-dire sans substitution tétraédrique, soit approximativement :



Sa structure résulte de l'empilement de feuillets élémentaires, eux-mêmes constitués par l'enchaînement dans le plan horizontal de mailles unité, comportant sept couches d'atomes superposées. Le cristal est constitué par une couche médiane d'ions aluminium hexacoordonnés entre deux couches externes d'ions silicium tétracoordonnés (figure 2).

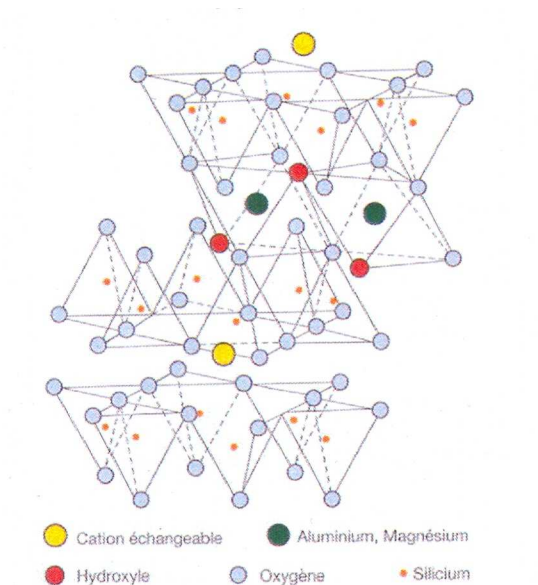


Figure 2 : Schéma d'un feuillet élémentaire de montmorillonite

Les ions silicium sont situés à l'intérieur d'un tétraèdre dont les sommets sont constitués par des atomes d'oxygène. Les ions aluminium sont situés à l'intérieur d'un octaèdre dont les sommets sont constitués par quatre atomes d'oxygène et deux ions hydroxyles.

Les sites octaédriques sont généralement occupés par  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , mais ces cations peuvent être substitués par de nombreux éléments ( $Li^+$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ). Lorsque les substitutions cationiques ne respectent pas les valences ( $Fe^{3+}$  à la place de  $Si^{4+}$  dans un site T ou  $Mg^{2+}$  à la place de  $Al^{3+}$  dans un site O), il y a un excès de charges négatives, localisées en surface ou délocalisées qui sont compensées par des cations échangeables placés dans les espaces interfoliaires. Ces cations compensateurs créent des liaisons ioniques entre les feuillets mais trop faibles pour que les molécules d'eau ne puissent s'immiscer entre les feuillets et les écarter. L'épaisseur du feuillet varie en fonction du nombre de couches de molécules d'eau absorbées entre les feuillets. L'hydratation la plus fréquente correspond à deux couches de molécules d'eau, ce qui donne une épaisseur de 1,4 nm pour une smectite sodique et 1,26 nm pour une calcique. L'examen de ces argiles montre que la taille des feuillets peut aller de 10 nm à quelques  $\mu m$ .

#### 111.2. Morphologie de l'état hydraté. Organisation macroscopique

Les études sur l'hydratation des smectites ont montré d'une part que l'hydratation des cations interfoliaires joue un rôle prédominant et d'autre part que deux échelles au moins sont impliquées : le feuillet et ses voisins, et l'organisation des groupes de feuillets (ou particules) en système poreux définissant plusieurs types d'eau. La figure 3 illustre deux situations extrêmes, la suspension de particules agrégées obtenue avec un cation interfoliaire divalent et le gel formé en présence de faibles concentrations de cation monovalent (Jin, 1994).

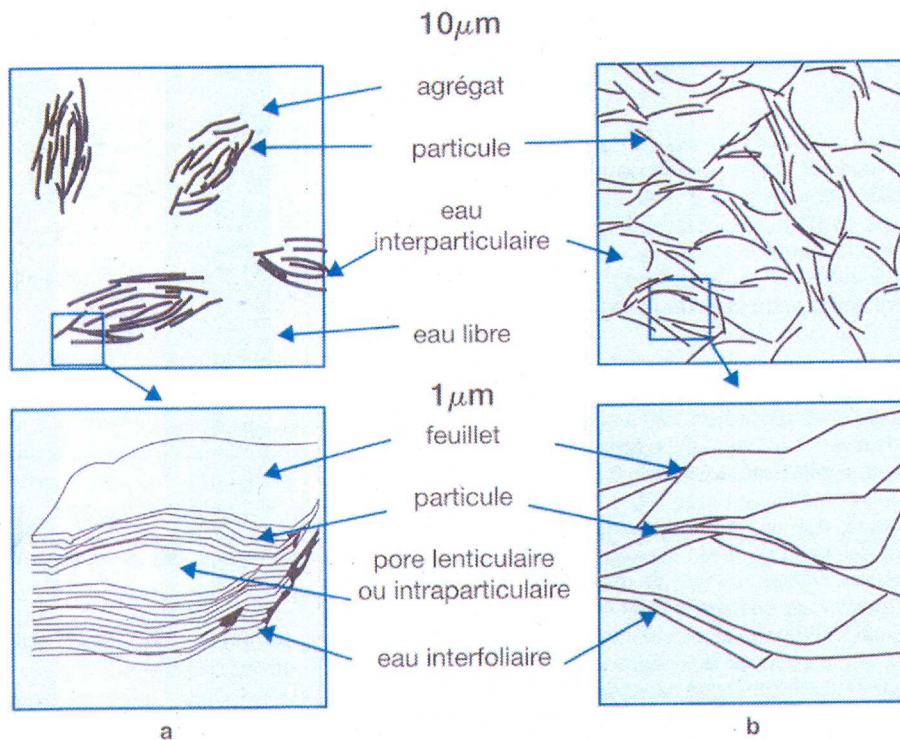


Figure 3 : Arrangement des feuillets de montmorillonite : a) en agrégats ; b) en gel (Jin, 1994)

Le feuillet tel qu'il a été décrit ci-dessus n'existe pratiquement jamais seul, sauf dans des cas particuliers et en milieu très dilué. Généralement, la particule la plus petite observée est un empilement de feuillets.

Le nombre de feuillets par particule est variable et dépend du système considéré : il est d'autant plus élevé que le cation interfoliaire est chargé et peu hydraté. Dans le cas de cations interfoliaires divalents ( $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ ) ou de monovalents concentrés ( $\text{Na}^+$ ) (Figure 3a), il se forme des agrégats qui résultent de la superposition de nombreux feuillets due aux forces attractives à courte distance (Prost, 1990). Dans le cas des cations interfoliaires monovalents comme le  $\text{Na}^+$  à faible concentration (figure 3b), les smectites présentent un gonflement illimité (Pons, 1980).

#### IV - Hydratation, gonflement et perméabilité des montmorillonites

##### IV.1 - Le système électrique argile – eau

Les interactions entre les particules d'argile, les ions dissous et l'eau sont causées par le champ de forces non équilibré à l'interface argile – eau.

Quand deux particules sont à proximité, leurs champs de forces respectifs se superposent et influencent le comportement du système si la magnitude de ces forces dépasse le poids des particules.

A l'attraction des cations par la surface des particules d'argile s'oppose la tendance des ions à diffuser et à se distribuer d'une manière homogène dans l'eau. Le résultat de cette interaction est un nuage d'ions entourant la particule, appelé la double couche électrique diffuse (figure 4).

##### IV.2. Le gonflement des argiles

La pénétration des molécules d'eau dans les espaces interfoliaires détermine l'augmentation du volume ou, à volume constant, l'apparition d'une pression de gonflement.

En fonction de la quantité d'eau entre les feuillets, il y aura de une à quatre couches d'eau. Lors de l'hydratation du cation compensateur, l'écartement des feuillets d'argile sera d'autant plus faible que le rayon ionique hydraté de ce cation sera petit.

Cette expansion est connue sous le nom de gonflement intracristallin.

Dans le cas d'une montmorillonite calcique le processus de gonflement est réduit à ce gonflement intracristallin. Son volume peut ainsi doubler (Madsen & Mitchell, 1989).

Dans le cas d'une montmorillonite sodique, il existe aussi un gonflement osmotique qui résulte de la formation de la double couche diffuse. L'épaisseur de celle-ci peut atteindre 100 nm, en fonction de la valence des ions, du pH de la solution, de la concentration et de la constante diélectrique de la solution.

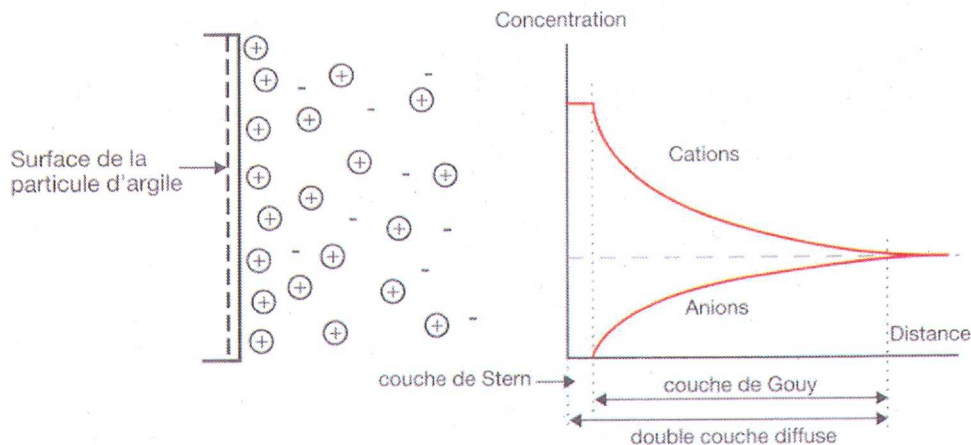


Figure 4 : Distribution des ions adjacents à la surface en concordance avec la théorie de la double couche diffuse

La caractérisation du gonflement intracristallin peut être réalisée par microgravimétrie d'adsorption - désorption (qui consiste à mesurer la quantité totale d'eau adsorbée par unité de masse d'argile en équilibre avec une pression relative d'eau donnée, en adsorption et en désorption et par diffraction des rayons X en atmosphère contrôlée. Le gonflement osmotique est plus important que le gonflement intracristallin. Il est étudié par des techniques macroscopiques (l'oedométrie, l'infiltration et la mesure des pressions de gonflement) et microscopiques (microscopie électronique à balayage et à transmission et diffusion des rayonnements).

Le volume résultant du gonflement libre intracristallin pour une montmorillonite calcique est de 2 à 4 fois supérieur au volume initial, tandis que pour une montmorillonite sodique (gonflement intracristallin + gonflement osmotique) il est de 8 à 15 fois supérieur.

Dans le cas de l'application d'une contrainte normale, le gonflement est inférieur et varie, pour des contraintes normales comprises entre 20 et 100 kPa, de 5 à 1 % pour une bentonite calcique et de 40 à 20 % pour une bentonite sodique (Egloffstein, 1995).

Les pressions de gonflement sont approximativement de 2 MPa dans le cas d'une bentonite sodique, pour la première couche d'eau adsorbée. Pour la deuxième couche d'eau adsorbée la pression de gonflement atteint 100 MPa et pour la troisième et la quatrième se rajoutent 27 MPa (Madsen et Mitchell, 1989). La pression de gonflement (P), dépend de la distance (2d) entre les feuillets et de la valence (v) du cation échangeable.

$$P = \frac{\text{constante}}{d^2 v^2}$$

La pression de gonflement est très dépendante de la densité sèche du matériau. Les données présentées figure 5 (d'après Dixon et al., 1996) montrent l'augmentation de la pression de gonflement avec la densité sèche.

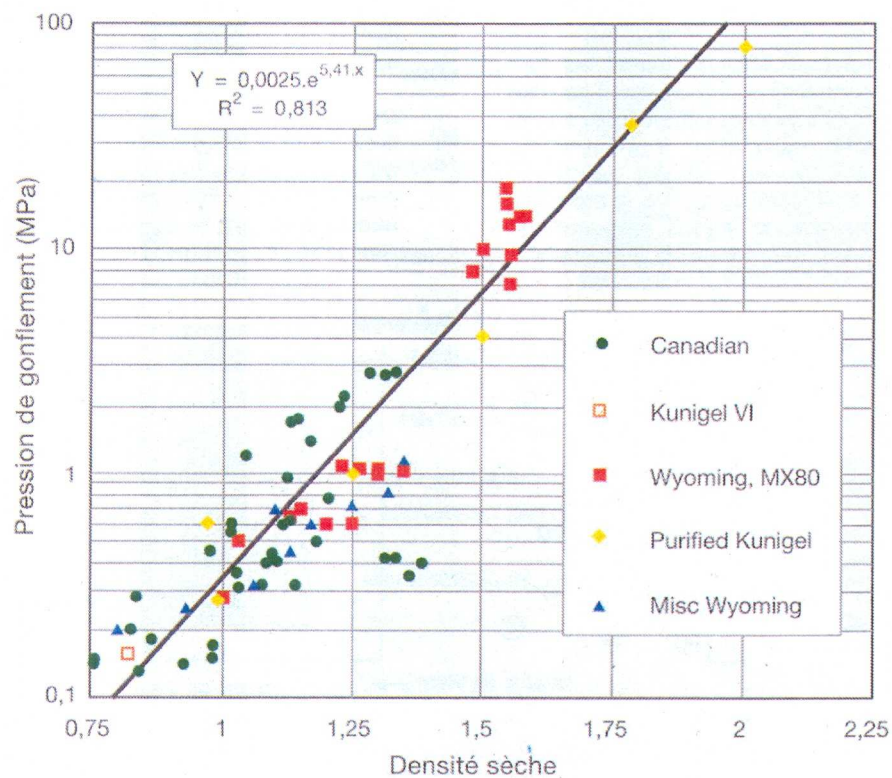


Figure 5 : Pression de gonflement en fonction de la densité sèche

L'évolution du gonflement  $\Delta h$  et de la pression de gonflement  $\sigma_G$ , en fonction du temps suivent une loi hyperbolique pour les temps suffisamment longs (Didier et al., 1985) :

Gonflement

$$\Delta h = \Delta h_{\infty} \times \frac{t}{t_{50} + t}$$

où :  $\Delta h$  est le gonflement de l'échantillon,  $t$  est le temps,  $\Delta h_{\infty}$  est le gonflement pour un temps infini,  $t_{50}$  est le temps correspondant à 50% du gonflement pour un temps infini.

Pression de gonflement

$$\sigma_G = \sigma_{G\infty} \times \frac{t}{t_{50} + t}$$

où :  $\sigma_G$  est la pression de gonflement,  $t$  est le temps,  $\sigma_{G\infty}$  est la pression de gonflement pour un temps infini,  $t_{50}$  est le temps correspondant à 50 % de la pression de gonflement pour un temps infini.

La représentation graphique de cette loi dans un repère  $t/\Delta h$  (ou  $t/\sigma$ ) -  $t$  est une droite qui permet de déterminer les paramètres  $\Delta h_{\infty}$  et  $t_{50}$ , respectivement  $\sigma_{G\infty}$  et  $t_{50}$ .

### IV.3. Facteurs influençant le gonflement

La localisation de la charge électrique

La cohésion des feuillets est assurée par des forces d'attraction de Van der Waals et les forces électrostatiques entre les feuillets chargés négativement et le cation interfoliaire chargé positivement. Les forces électrostatiques sont d'autant plus élevées que la charge du feuillet est élevée et qu'elle est localisée en position tétraédrique. Dans ce cas, les sites de substitution tétraédrique fournissent des points d'ancrage qui maintiennent les feuillets dans des positions précises les uns par rapport aux autres. Lorsque la charge est située en position octaédrique, ces points d'ancrage sont inexistantes et la structure est désordonnée (Berend, 1991).

Le cation compensateur

La taille du cation compensateur est un facteur important du gonflement. Leur rayon hydraté est d'autant plus faible que leur rayon cristallin est élevé. La valence d'un cation influence également le rayon hydraté : les cations divalents sont plus hydratés que les cations monovalents de taille égale.

La stabilité (facilité d'échange) des cations compensateurs joue aussi un rôle important.

L'activité de l'eau

L'hydratation des smectites dépend de l'activité de l'eau, respectivement du potentiel chimique de l'eau dans une solution ou de l'eau dans une argile. La pression de gonflement d'une argile en contact avec une solution aqueuse est considérée équivalente à la pression osmotique d'une membrane semi-perméable séparant deux fluides de salinités différentes.

#### IV.4. Propriétés hydrauliques

La perméabilité des argiles est dépendante de la microstructure des particules (forme, dimension, arrangement), de la densité et de la teneur en eau, ainsi que de la nature du fluide.

La figure 6 présente la variation de la perméabilité de plusieurs bentonites en fonction de la densité sèche (d'après Dixon et al. 1996).

Ces données montrent que la perméabilité des bentonites varie entre  $10^{-11}$  et  $10^{-14}$   $m.s^{-1}$  pour des densités sèches variant entre 0,5 et 2,2. La plage des valeurs de la densité sèche de la bentonite contenue dans un GSB variant entre 0,8 et 1, la fourchette de la perméabilité attendue se situe, à titre indicatif, entre  $10^{-11}$  et  $10^{-12}$   $m.s^{-1}$ .

La nature du fluide en contact avec la bentonite joue un rôle primordial dans les performances hydrauliques de celle-ci.

D'une manière générale, les modifications des propriétés des argiles dues aux interactions chimiques résultent de (Goldman et al., 1990) :

- l'altération de la structure de l'argile due aux influences sur la double couche diffuse ;
- la dissolution des constituants de l'argile par les acides et les bases purs ;
- la précipitation dans les pores ;
- l'obturation des pores par les micro-organismes.

Les montmorillonites, surtout les montmorillonites sodiques, échangent facilement le cation prédominant avec d'autres cations (le sodium est échangé par le calcium, le magnésium ou le potassium dans le cas des montmorillonites sodiques, mais également par des cations organiques) ce qui conduit à une modification des propriétés de gonflement et de perméabilité.

Les composés inorganiques affectent la perméabilité des argiles par les effets produits sur leur texture. Les acides provoquent la floculation et attaquent la structure cristalline, spécialement la couche octaédrique. Les bases provoquent une dispersion et attaquent la couche tétraédrique.

Les minéraux argileux ont des interactions avec les substances organiques par adsorption, intercalation et échange de cations. Les molécules d'eau de la double couche peuvent être remplacées par une grande variété de molécules organiques. La faible constante diélectrique des substances organiques par rapport à l'eau peut limiter le gonflement ou induire une floculation.



En général, les effets des substances chimiques sur les caractéristiques hydrauliques des bentonites sont d'autant plus importants que les concentrations sont fortes.

Pour certains polluants agressifs il est parfois nécessaire de réaliser une présaturation à l'eau de la bentonite avant de la mettre en contact avec le contaminant pour diminuer d'une manière considérable les effets sur la perméabilité. Ruhl et Daniel (1996) ont réalisé des essais sur des géosynthétiques bentonitiques secs ou préhydratés à l'eau, en utilisant des lixiviats réels ou synthétiques. Ils ont montré que les GSB préhydratés à l'eau ont des perméabilités aux lixiviats presque identiques aux perméabilités à l'eau tandis que les GSB hydratés directement avec le même lixiviat ont des perméabilités supérieures de 4 ordres de grandeur. Ces auteurs ont également mis en évidence que les lixiviats les plus agressifs sont ceux qui ne contiennent pas de particules solides en suspension ou de micro-organismes et qui ne présentent pas des concentrations importantes en ions  $Ca^{2+}$ .

Une expérimentation spécifique s'avère nécessaire pour chaque cas, dans des conditions les plus proches possibles de la réalité.

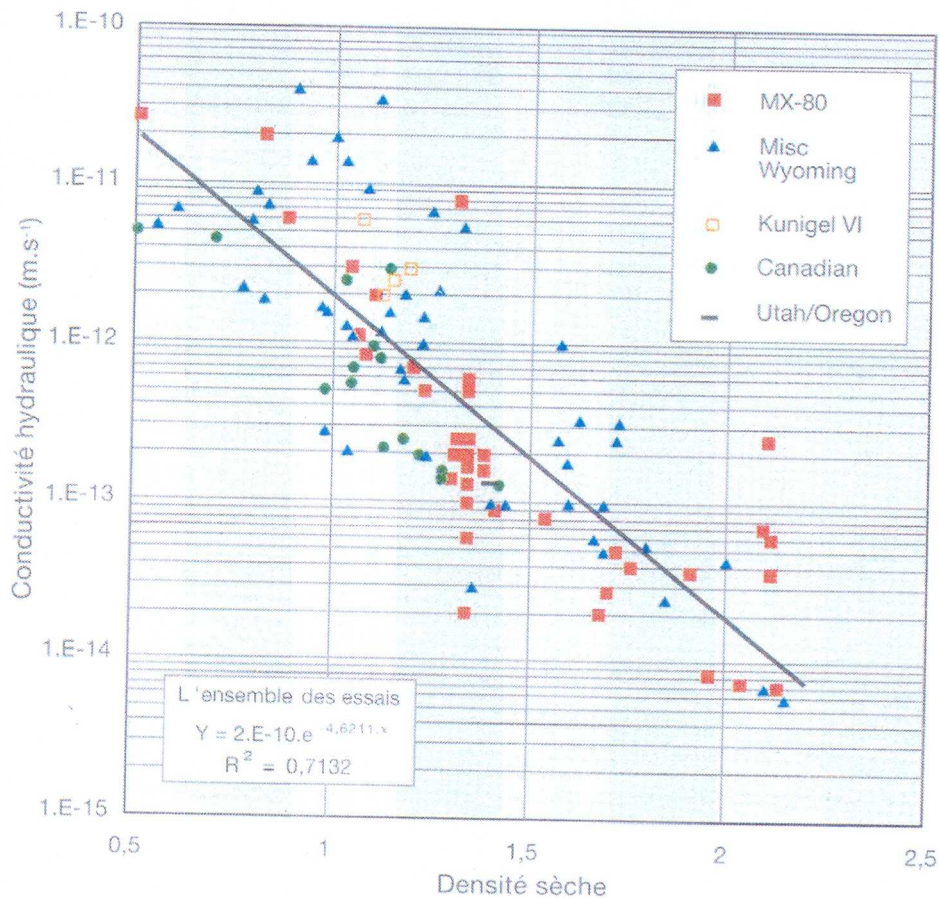


Figure 6 : Relation entre la conductivité hydraulique des bentonites et la densité sèche

## Bibliographie

Chamayou, H., Legros, J.P., 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Presses universitaires de France.

Didier, G., Bourdeau, Y., Kastner, R., 1985. Méthode d'étude du gonflement des marnes. Proc. 3rd French – Polish Seminar on applied soil mechanics, 251-264.

Dixon, D.A., Gray, M.N., 1996. Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and the USA. Proceedings of the second international congress on Environmental Geotechnics, (IS – Osaka), Balkema, 1, 43-48.

Egloffstein, T., 1995. Properties and test methods to assess bentonite used in Geosynthetic Clay Liners. Geosynthetic Clay Liners, Proceedings of the International Symposium, Nuremberg,

Goldman, L.J., Greefield, L.I., 1990. Clay liners for waste management facilities. design, Construction and Evaluation. Pollution technology review No. 178, Noyes Data Corporation.

Jin, H., 1994. Etude expérimentale du comportement des suspensions de bentonite au cours des forages. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Lorraine.

Madsen, F.T., Mitchell, J.K., 1989. Chemical effects on clay hydraulic conductivity and their determination. Mitt. des Inst. für Grundbau und Bodenmechanik 135, ETH Zürich.

Pons, C.H., 1980. Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eau-smectites par diffusion aux petits angles du rayonnement X synchrotron. Thèse de doctorat d'état, Université d'Orléans.

Prost, R., 1990. Relations eau-argile : structure et gonflement des matériaux argileux. Matériaux argileux – structure, propriétés et applications, publication société française de minéralogie et de cristallographie.

Ruhl, J., Daniel, D.E., 1997. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(4), 369-381.

Tessier, D., 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse de doctorat d'état, Université Paris VII, INRA Versailles publications, 364 p.

Tessier, D., 1992. Propriétés des argiles : hydratation, gonflement et relation avec leur texture. Importance pour les sols. Gréco géomatériaux, les argiles : microstructure et lois de comportement, 29 octobre 1992.

Tessier, D., Lajurie, A., Petit, J.-C., 1992. Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. Applied Geochemistry, Suppl. Issue No. 1, 151-161.

Van Olphen, H., 1977. An introduction to clay colloid chemistry, 2<sup>nd</sup> Ed., J. Wiley and sons Eds., 301 p.

Annexe C : Utilisation des Géosynthétiques Bentonitiques (GSB) dans les Installations de Stockage de Déchets (ISD) : Caractéristiques minimales à prescrire dans les fiches techniques des producteurs et dans les cahiers des charges pour la consultation des entreprises

Ce document est organisé de manière à faire apparaître de façon explicite les éléments devant figurer sur les fiches du marquage CE en application de la norme NF EN 13493.

On reporte ainsi dans le premier tableau de cette annexe les caractéristiques nécessaires pour harmonisation (H) que le marquage CE oblige le producteur à renseigner.

Toutes les autres caractéristiques indiquées dans cette annexe devront être fournies dans un document d'accompagnement, indépendant du certificat de marquage CE.

Les tableaux 1 à 3 indiquent tout d'abord les caractéristiques que le groupe de travail a jugées nécessaires et qui sont donc à **prescrire systématiquement** dans un **cahier des charges** et, en conséquence, à définir dans les **fiches techniques** des produits. Dans ces tableaux, on a pu indiquer certaines caractéristiques qui étaient classées comme S (dépendantes des conditions d'utilisation) par la norme NF EN 13493 mais que le groupe de travail a jugé importantes.

Puis les tableaux 4 à 6 présentent des caractéristiques définies comme étant « applicables ». Par définition, leur prescription ou leur définition sera décidée par le maître d'œuvre ou le producteur, en fonction des spécificités de chaque projet. A noter que l'on n'a indiqué dans ce tableau que les caractéristiques nouvelles par rapport aux tableaux précédents.

La structure de ce document reprend la logique du dimensionnement par fonctions déjà définie dans les fascicules 11 et 12 du CFG ainsi que dans le CD Rom traitant de l'utilisation des géosynthétiques dans les ISD.

Les différentes caractéristiques, nécessaires comme applicables, sont classées en fonction de l'objet auquel elles s'appliquent : la bentonite, le GSB ou le DEG. Pour chaque caractéristique on précise si c'est une caractéristique descriptive, fonctionnelle, de durabilité ou de mise en oeuvre.

La règle de priorité concernant l'usage des normes sur le territoire français est habituelle :

ISO > EN > NF > XP P > autres.

Propriétés à spécifier obligatoirement (correspondant au H du marquage CE)

Tableau 1 : Propriétés à spécifier obligatoirement pour le Géosynthétique bentonitique

Type de caractéristique	Propriété à tester	Méthode d'essai	Remarques
Descriptive	Perméabilité à l'eau. Etanchéité aux liquides	ASTM D 5887	
Descriptive	Résistance en traction	EN ISO 10319	Essai applicable aux géotextiles et apparentés ;  Essai à réaliser avec une teneur en eau de la bentonite comprise entre 5 et 25 %
Descriptive	Poinçonnement statique	EN ISO 12236	Valeurs comprises entre 1800 et 3000 N selon l'assemblage (présence ou non d'un géotextile tissé)
Durabilité	Oxydation	EN ISO 13438:2004	L'EN ISO 13438 est applicable aux éléments géotextiles et aux fils de renfort des GSB

Propriétés nécessaires en complément des propriétés réglementaires (incluant les A du marquage CE)

Tableau 2 : propriétés nécessaires en complément des propriétés réglementaires pour le GSB

Type de caractéristique	Propriété à tester	Méthode d'essai	Remarques
Descriptive	Epaisseur	EN 964-1	<b>Caractéristique fonctionnelle :</b>  à mesurer sous 2 à 20 kPa.  La teneur en eau durant l'essai doit être reportée.
Descriptive	Masse par unité de surface	EN 14196	Caractéristique à mesurer à 0 % de teneur en eau.  Masse minimale pour toute éprouvette testée de 4,75kg/m <sup>2</sup> pour les bentonites calciques naturelles.
Descriptive	Déformation à la rupture	EN ISO 10319	Essai applicable aux géotextiles et apparentés ;  essai à faire avec une teneur en eau de la bentonite

			comprise entre 5 et 25 %
Durabilité	Micro-organismes	EN 12225	Dégradation microbiologique sur géotextiles et produits apparentés
Durabilité	Résistance chimique	EN 14414	Dégradation chimique sur géotextiles et apparentés
Fonctionnelle	Gonflement sous contrainte de confinement	NF P84-705	Mesuré à l'oedoperméamètre. A partir des données du projet LIXAR 2, le gonflement est de 1 à 5 mm sous 10 kPa pour les bentonites sodiques naturelles et calciques activées et inférieur à 0,5mm pour les bentonites calciques.
Fonctionnelle	Perméabilité du GSB sous contrainte de confinement	NF P84-705	Mesure du flux et de la perméabilité sous contrainte de confinement. Calcul du coefficient de perméabilité à partir de l'épaisseur finale, pour contraintes inférieures à 400 kPa et toutes charges hydrauliques (entre 0,1m et 1,2m)  160 kPa : $k \leq 3 \times 10^{-11}$ m/s (fond)  10 kPa : $k \leq 5 \times 10^{-11}$ m/s (couverture). dans ce dernier cas, l'épaisseur fonctionnelle minimale mesurée était de 5,8mm pour les sodiques naturelles et calciques activées.
Fonctionnelle	Perméabilité des joints	NF P 84-706	Flux de liquide par unité de longueur de recouvrement.  Flux dans la zone de recouvrement <b>Fr</b> :  $Fr = Fc.l$  Avec : (l) largeur du recouvrement, (Fc) flux en partie courante et (Fr) en m <sup>3</sup> /m/s (débit par unité de longueur de recouvrement)
Durabilité	Poinçonnement dynamique du GSB	EN ISO 13433	Chute de cône
Fonctionnelle	Conteneurisation	pas de méthode d'essai	

Tableau 3 : propriétés nécessaires en complément des propriétés réglementaires pour la bentonite

Type de caractéristique	Propriété à tester	Méthode d'essai	Remarques
Descriptive	Indice de gonflement	XP P84-703	Norme équivalente à la ASTM D 5890.  >24 ml/2g pour les bentonites sodiques naturelles et calciques activées  Compris entre 6 et 12 ml/2g pour les bentonites calciques
Descriptive	Lixiviation (solubilité à l'eau)	EN 14415	
Descriptive	Valeur de Bleu	NF P94-068	≤30 pour les bentonites sodiques naturelles et calciques activées, entre 15 et 25 pour les bentonites calciques d'après les résultats de LIXAR 2
Descriptive	Minéralogie	pr EN 13968	% de smectite à 10 % près  60 % minimum
Descriptive	Calcidolométrie	NF ISO 10693	Pourcentage de carbonate (de calcium pour les sodiques naturelles et calciques activées : ≤ 5% en masse
Descriptive	Masse de bentonite par unité de surface du GSB	NF EN 14196	Masse de bentonite minimale à 0% de teneur en eau : 4,5kg/m <sup>2</sup> pour les bentonites sodiques naturelles et calciques activées. 9 kg/m <sup>2</sup> pour les bentonites calciques naturelles.
Durabilité	compatibilité physico-chimique		Détermination de l'évolution à moyen terme et à long terme de la minéralogie de la bentonite dans un environnement donné

Tableau 4 : propriétés nécessaires en complément des propriétés réglementaires Pour le DEGB

Type de caractéristique	Propriété à tester	Méthode d'essai	Remarques
Fonctionnelle	Stabilité sur pente		A étudier au cas par cas dans l'étude géotechnique du projet (y compris les ancrages) : il s'agit ici de la stabilité à long terme, l'ISD se remplissant et les conditions d'hydratation pouvant varier.

Propriétés définies comme applicables

Tableau 5 : propriétés définies comme applicables au GSB

Type de caractéristique	Propriété à tester	Méthode d'essai	Remarques
Fonctionnelle	Système de liaisonnement du GSB	Peel strength ASTM D.6496-99	Elle permet de décrire le mode de fonctionnement et l'efficacité du système de liaisonnement.  Seulement pour les produits aiguilletés
Fonctionnelle, de mise en œuvre et de durabilité	Cisaillement interne du GSB	ASTM D 6243	Cette caractéristique se réfère aux catégories : « <b>fonctionnelle</b> », « <b>de mise en œuvre</b> » et « <b>durabilité</b> »
Fonctionnelle	Perméabilité au gaz du GSB	XP P84-707	
Fonctionnelle	Autocicatrisation	XP P84-708	La cicatrisation est évaluée au droit de 4 trous de 10, 20, 30 et 40 mm ; le GSB étant placé sous 10 kPa durant 15 jours.
Durabilité	Vieillessement dû aux conditions climatiques	EN 12224	Résistance aux UV des géofilms et géotextiles
Durabilité	Résistance aux agressions chimiques	NF P84-705	Caractéristique de <b>durabilité</b> du GSB au sein du DEGB : mesure de la perméabilité aux <b>liquides autres que de l'eau</b>

Tableau 6 : propriétés définies comme applicables à la bentonite

Type de caractéristique	Propriété à tester	Méthode d'essai	Remarques
Descriptive	CEC	NF X 31.130	70 méq pour 100 g sec de bentonite minimum pour les bentonites sodiques naturelles et calciques activées
Descriptive	Analyse isotopique		Indicateur de l'origine de la bentonite



Tableau 7 : propriétés définies comme applicables au DEG

Type de caractéristique	Propriété à tester	Méthode d'essai	Remarques
Mise en oeuvre	Poinçonnement dynamique du DEG	NF P84-506	Caractéristique applicables aux géomembranes

Référence :

BRGM (2008). Projet LIXAR 2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques. Rapport final BRGM/RP-56356-FR.



Figure 1 : Détermination de l'indice de gonflement selon la norme **XP P 84-703** et **ASTM D5890**



Figure 2 : Détermination de la teneur en carbonates (NF P 94-048)

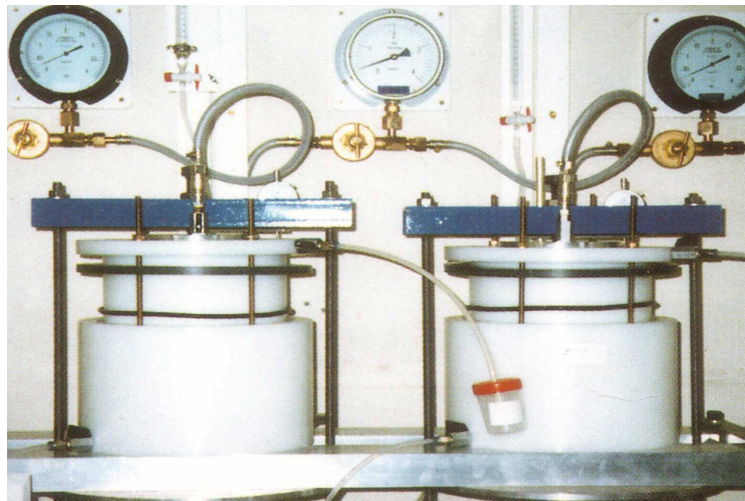


Figure 3 : Gonflement et perméabilité du GSB sous contrainte de confinement (NF P 84-705)



Figure 4 : Débit de fuite par unité de longueur de recouvrement (NF P 84-706)

## Annexe D : Exemples de mauvaises mises en œuvre ou conditions d'utilisation de GSB



Figure 1 – Mise en tension de GSB et géomembrane sur talus. Etat de sol support non recevable pour la pose d'un GSB (photo T. Gisbert)



Figure 2 – GSB plissé, non étendu de façon acceptable (photo T. Gisbert)



Figure 3 – Lés de GSB déroulés de façon désordonnée (photo T. Gisbert)



Figure 4 – Stockage de rouleaux de géosynthétiques ne respectant pas les règles de l'art : présence de végétation, rouleaux non emballés, non isolés du sol, mal empilés (photo T. Gisbert)

## Crédits photos

Figure 1 : Naue

Figure 5 : Naue

Figure 6 : Huesker

Figure 7 : T. Gisbert

Figure 15 : Insa Lyon

Figure 16 : Naue

Figure 18 : Huesker

Figure 19 : Naue

Figure 20 : Agru et Huesker

Figure 21 : Naue

Figure 22 : Huesker

Figure 24 : Huesker

Figure 26 a : Naue

Figure 26b : Huesker et Agru

Figure 35 : Huesker et naue

Figure 36 : Naue

Figure 37 : T. Gisbert

Figure 39 : T. Gisbert et Agru

Annexe C : photos Insa Lyon