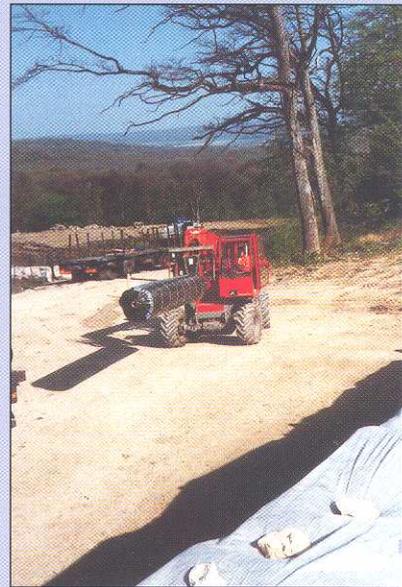


Recommandations  
générales  
pour la réalisation  
d'étanchéité par  
Géosynthétiques  
Bentonitiques



Stockage sur site



Manutention avec un éperon



Pose sur support horizontal



Pose sur talus



Pose sur talus



Apport du matériau de confinement et de protection



Atelier de mise en oeuvre de la structure de confinement et de protection



Tranchée d'ancrage



Le **Comité Français**  
des **Géosynthétiques**  
est une association  
à but non lucratif (loi de 1901)  
qui rassemble les organismes,  
sociétés ou associations  
s'intéressant aux géosynthétiques  
(géomembranes, géotextiles et  
produits apparentés) :  
services publics,  
établissements d'enseignement  
et de recherche,  
entreprises de travaux publics,  
bureaux d'études,  
producteurs de géosynthétiques  
et distributeurs,  
dans le but de contribuer  
au développement  
des géosynthétiques  
par l'échange d'informations  
et l'étude des questions d'intérêt  
général relatives à ces matériaux  
et à leur emploi.

**secrétariat :**

9, rue du Gué  
92500 Rueil Malmaison  
Téléphone : 01.41.96.90.93  
Télécopie : 01.41.96.91.05

**siège social :** I.T.F.

280, avenue Aristide-Briand  
B.P. 141 - 92293 Bagneux Cedex

---

**1998**

Fascicule n° 12

---

Reproduction même partielle  
strictement interdite

# SOMMAIRE DU FASCICULE

1

<b>GENERALITES</b> .....	p	4
1.1 - AVANT-PROPOS .....	p	4
1.2 - DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES (D.E.G.B.) .....	p	4
1.3 - ORGANISATION DU FASCICULE .....	p	5

2

## **MATERIAUX CONSTITUTIFS DU DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES** .....

<b>2.1 - STRUCTURE SUPPORT</b> .....	p	6
2.1.1 - Fonctions .....	p	6
2.1.2 - Matériaux .....	p	6
2.1.3 - Dispositif de drainage .....	p	7
2.1.3.1 - Produits ronds .....	p	7
2.1.3.2 - Produits plats (géotextiles, géospaceurs, géocomposites drainants, etc.) .....	p	7
<b>2.2 - STRUCTURE D'ETANCHEITE : LE (OU LES) GEOSYNTHETIQUE(S) BENTONITIQUE(S)</b> .....	p	7
2.2.1 - Matériaux constitutifs des G.S.B. .....	p	7
2.2.1.1 - Bentonite .....	p	7
2.2.1.2 - Géotextiles .....	p	8
2.2.1.3 - Géofilms .....	p	9
2.2.2 - Différents types de géosynthétiques bentonitiques .....	p	9
2.2.2.1 - Géotextiles bentonitiques collés .....	p	9
2.2.2.2 - Géotextiles bentonitiques aiguilletés .....	p	9
2.2.2.3 - Géotextiles bentonitiques cousus .....	p	9
2.2.2.4 - Géofilms bentonitiques .....	p	9
<b>2.3 - Structure de confinement et de protection</b> .....	p	10

3

## **CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DU DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES** .....

<b>3.1 - GENERALITES</b> .....	p	11
<b>3.2 - CONCEPTION</b> .....	p	11
3.2.1 - Paramètres à prendre en compte .....	p	11
3.2.1.1 - Considérations géométriques .....	p	12
3.2.1.1.1 - Talus .....	p	12
3.2.1.1.2 - Crêtes des talus .....	p	12
3.2.1.1.3 - Fond de forme - structure support .....	p	12
3.2.1.2 - Conditions climatiques .....	p	12
3.2.1.3 - Sous-pressions .....	p	13
3.2.1.4 - Faune .....	p	13
3.2.1.5 - Tassement des structures supports .....	p	13
3.2.1.6 - Erosion et instabilité des sols sous-jacents et sus-jacents au G.S.B. .....	p	13
3.2.1.7 - Poinçonnements .....	p	14
3.2.1.8 - Écoulement d'un liquide (canal, zone d'alimentation d'un bassin, lagune aérée, etc.) .....	p	14
3.2.1.9 - Vagues et batillage .....	p	14
3.2.1.10 - Débit de fuite admissible .....	p	14
3.2.1.11 - Agressions chimiques .....	p	14
3.2.1.12 - Exigences sanitaires ou biologiques .....	p	15
3.2.1.13 - Vandalisme .....	p	15
3.2.1.14 - Végétation .....	p	15
3.2.1.15 - Trafic .....	p	15
3.2.1.16 - Curage, entretien .....	p	15
3.2.2 - Caractéristiques des géosynthétiques bentonitiques .....	p	15
3.2.3 - Critères de choix des géosynthétiques bentonitiques .....	p	19
3.2.4 - Essais .....	p	21

3.3 - MISE EN OEUVRE	p 21
3.3.1 - Fond de forme	p 22
3.3.1.1 - Végétation	p 22
3.3.1.2 - Compactage	p 22
3.3.2 - Structure support	p 22
3.3.2.1 - Couche de forme	p 22
3.3.2.2 - Couche support	p 22
3.3.3 - Structure d'étanchéité	p 22
3.3.3.1 - Conditionnement	p 22
3.3.3.2 - Stockage et transport	p 23
3.3.3.3 - Plans de pose et de récolement	p 23
3.3.3.4 - Mise en place	p 23
3.3.3.4.1 - Manutentions	p 23
3.3.3.4.2 - Déroulage	p 23
3.3.3.4.3 - Mise en recouvrement des lés	p 24
3.3.3.5 - Ancrages	p 25
3.3.3.5.1 - Ancrage en tête	p 25
3.3.3.5.2 - Ancrage intermédiaire	p 26
3.3.3.5.3 - Ancrage en pied	p 28
3.3.3.6 - Raccordements aux ouvrages annexes	p 29
3.3.4 - Structure de confinement et de protection	p 31
3.3.4.1 - Généralités	p 31
3.3.4.2 - Solutions courantes	p 31
3.3.4.3 - Dispositions constructives	p 31
3.3.5 - Hydratation des G.S.B.	p 32
3.3.6 - Dispositions relatives aux arrêts et reprises du chantier	p 32

## 4

<b>CONTROLES</b>	p 33
4.1 - DOMAINE DES CONTROLES	p 33
4.2 - RECOMMANDATIONS GENERALES RELATIVES AUX CONTROLES D'UN D.E.G.B.	p 35
4.2.1 - Contrôles de l'organisation du chantier	p 35
4.2.2 - Contrôles des zones de stockage et de manutention des produits	p 36
4.2.3 - Contrôles de réception des matériaux et matériels sur le chantier	p 36
4.2.4 - Planches d'essais	p 36
4.2.5 - Contrôles associés à la mise en œuvre et réception de la structure support	p 37
4.2.6 - Contrôles du plan de pose (ou de calepinage) des géosynthétiques bentonitiques	p 37
4.2.7 - Contrôles du plan de phasage des travaux	p 37
4.2.8 - Contrôles associés à la mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques	p 37
4.2.9 - Contrôles associés à la mise en œuvre de la structure de protection et de confinement	p 38
4.2.10 - Contrôles du plan de récolement	p 38
4.3 - FREQUENCE DES CONTROLES DE RECEPTION DES CARACTERISTIQUES DES G.S.B.	p 38

## 5

<b>ASSURANCE DE LA QUALITE</b>	p 39
5.1 - ORGANISATION DES ACTIONS QUALITE	p 39
5.2 - CONTENU DU PLAN D'ASSURANCE QUALITE (P.A.Q.)	p 40
5.3 - CONTENU DU SCHEMA DIRECTEUR DE LA QUALITE (S.D.Q.)	p 40
5.4 - DOCUMENTS D'ASSURANCE QUALITE	p 40

## ANNEXES

ANNEXE A : Abréviations	p 42
ANNEXE B : Compléments sur la bentonite	p 43
ANNEXE C : Liste des normes et essais relatifs aux G.S.B.	p 52



# GENERALITES

## 1.1 - AVANT-PROPOS

L'objet de ce fascicule est de fournir des informations générales sur les Géosynthétiques Bentonitiques (G.S.B.) ainsi que des recommandations pour leur utilisation et leur mise en œuvre.

Ce fascicule présente la particularité d'intervenir relativement tôt au regard de la pratique industrielle. De ce fait, au moment de son établissement, certains points ne sont pas définis. Ceci concerne notamment les essais. Le choix retenu par les rédacteurs est cependant d'identifier les éléments techniques utiles à l'emploi des géosynthétiques bentonitiques, même si la détermination de leurs caractéristiques n'est pas encore normalisée.

Par géosynthétiques bentonitiques on entend tous produits manufacturés en forme de nappe associant des géosynthétiques à de la bentonite, utilisés dans le domaine de la géotechnique et du génie civil et assurant un rôle d'étanchéité.

Les recommandations générales exposées dans ce fascicule s'appliquent principalement aux :

- bassins à eau claire, de décantation ou à liquide polluant (par exemple bassins de lagunage aéré ou naturel),
- centres de stockage de déchets (C.S.D.),

- ouvrages de protection de la nappe phréatique,
- canaux, fossés et rigoles,
- ouvrages annexes de barrages, (berges, digues, etc.),
- routes et voies ferrées.

Les géosynthétiques bentonitiques comprennent les géotextiles bentonitiques et les géofilms bentonitiques dont les définitions sont précisées au chapitre 2.2.2.

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

## 1.2 - DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES (D.E.G.B.)

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'Etanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques (D.E.G.B.), reposant sur le fond de forme, surface stable dont la géométrie dépend de la destination de l'ouvrage.

Le D.E.G.B. est constitué des trois structures suivantes (**voir figure 1**) :

- **la structure support**, ensemble des éléments placés entre le fond de forme et la structure d'étanchéité qui comprend :
  - la couche de forme reposant sur le fond de forme,
  - la couche support sur laquelle repose la structure d'étanchéité,
  - les dispositifs éventuels de drainage (eau et gaz).

Un ou plusieurs des éléments ci-dessus peuvent ne pas exister ou se trouver confondus dans une même couche. Dans le cas le plus simple, le fond de forme constitue directement la structure support de la structure d'étanchéité.

- la **structure d'étanchéité** est constituée par un géosynthétique bentonitique. Le géosynthétique bentonitique peut aussi être associé à des géomembranes ou des matériaux naturels (argiles compactées ou sols traités) formant ainsi des étanchéités combinées.
- la **structure de confinement et/ou de protection** est l'ensemble des matériaux placés au-dessus de la structure d'étanchéité.

- la conception et la mise en œuvre du D.E.G.B. (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 G.S.B.

### 1.3 - ORGANISATION DU FASCICULE

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

- les généralités (chapitre 1),
- les matériaux constitutifs du D.E.G.B. (chapitre 2),

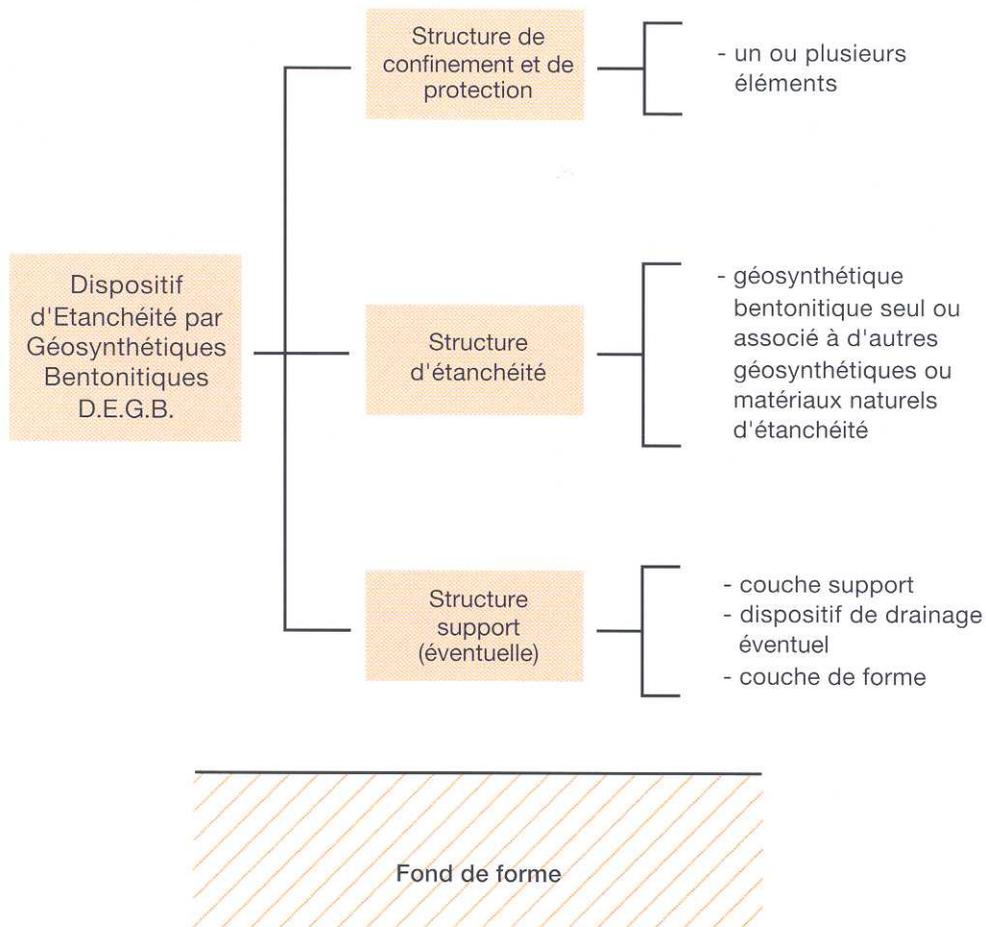


Figure 1 : Dispositif d'Étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques (D.E.G.B.)

# 2

## MATERIAUX CONSTITUTIFS DU DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYN- THETIQUES BENTONITIQUES

Les critères de choix des matériaux constitutifs du D.E.G.B. 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 D.E.G.B., 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.

## 2.1 - STRUCTURE SUPPORT

Elle comprend la couche de forme et la couche support du géosynthétique bentonitique.

### 2.1.1 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 (fonction mécanique) 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.

### 2.1.2 Matériaux

Lorsque le fond de forme est constitué de matériaux non poinçonnants en accord avec les dispositions de la conception (sable, matériaux argileux, etc.), il est possible d'y poser directement la structure d'étanchéité. La structure support se confond alors avec le fond de forme, ses fonctions mécaniques étant assurées sans matériau d'apport.

Cependant, dans le cas de risque de sous-pression, si la perméabilité du fond de forme est insuffisante, un drainage complémentaire doit être interposé.

Lorsque le fond de forme est trop irrégulier, il est nécessaire de réaliser une couche de forme à partir de matériaux d'apport, naturels ou non.

Deux options sont possibles :

- sélectionner les matériaux de la couche de forme vis-à-vis du critère de poinçonnement : dans ce cas, la couche de forme joue également le rôle de couche support,
- constituer, par raison d'économie, la couche de forme à partir de matériaux plus grossiers et/ou moins triés : dans ce cas, une couche support doit être interposée sous la structure d'étanchéité.

Par ailleurs, selon la granulométrie et l'état de surface final de la couche support, un géotextile complémentaire peut s'avérer nécessaire pour satisfaire la condition de non poinçonnement.

### 2.1.3 Dispositif de drainage

Tout liquide se trouvant sous le géosynthétique bentonitique (nappe phréatique ou arrivée d'eau ponctuelle) 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 éviter le colmatage du drain. Ce dispositif de drainage pourra être justifié par les dispositions de conception.

Le géosynthétique bentonitique peut également être soumis à des sous-pressions gazeuses : sols fermentescibles, remontées rapides de la nappe phréatique dans un sol non saturé, fuites de liquides chargés en matières organiques, 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 (voir fascicule numéro 6 du C.F.G.).

Les matériaux synthétiques constitutifs de ces réseaux sont des produits ronds ou plats.

#### 2.1.3.1 Produits ronds

Les tuyaux de drainage et les collecteurs peuvent être en polyéthylène haute densité (PEHD), polychlorure de vinyle (PVC), parfois en béton.

#### 2.1.3.2 Produits plats (géotextiles, géospaceurs, géocomposites drainants, etc.)

Les produits plats peuvent véhiculer, de manière générale, un débit dans leur plan. Cette propriété a été particulièrement développée pour certains d'entre eux.

Leur épaisseur varie de quelques millimètres à quelques centimètres.

Leur tassement sous une sollicitation non nulle est variable suivant le produit considéré et peut, dans certains cas, affecter notablement leur capacité drainante. La transmissivité, qui caractérise cette propriété, est en effet égale au produit de la perméabilité hydraulique dans le plan du produit par son épaisseur.

L'usage de ces produits doit donc être assujéti à un énoncé clair des performances sous charge et à long terme.

Dans le cas où les produits plats se trouveraient en contact direct avec la structure d'étanchéité, on veillera à ce qu'ils n'induisent pas de poinçonnements, y compris à long terme.

## 2.2 - STRUCTURE D'ETANCHEITE : LE (OU LES) GEOSYNTHETIQUE(S) BENTONITIQUE(S)

Les géosynthétiques bentonitiques assurent la fonction "étanchéité" uniquement après hydratation et confinement. Dans le cas de l'emploi des géosynthétiques bentonitiques dans les fonctions "réparation" et "protection", la pré-hydratation n'est pas requise nécessairement.

### 2.2.1 Matériaux constitutifs des G.S.B.

#### 2.2.1.1 Bentonite

#### Historique

Le terme "bentonite" désigne une famille d'argiles, appelée ainsi après la découverte, en 1888, du gisement de FORT BENTON dans le Wyoming, USA. Le constituant principal de ces argiles est la montmorillonite.

nite, un minéral formé de feuillets, dont les premiers gisements purs ont été découverts à MONTMORILLON, en France.

### Structure et propriétés

La montmorillonite est un silicate d'alumine, ou de magnésium, hydraté. Le feuillet élémentaire est formé de trois couches : deux couches tétraédriques de  $\text{SiO}_2$  entre lesquelles se situe une couche d'octaèdres d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , avec parfois quelques cations  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  en substitution de cations  $\text{Al}^{3+}$ .

La présence de ces cations  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  induit un déséquilibre de charge à la surface du feuillet : des cations comme  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$  viennent alors se fixer sur cette surface. Selon le cas, la bentonite sera dite sodique naturelle (cas des bentonites du Wyoming) ou calcique naturelle (cas des bentonites européennes).

La nature du cation influence les propriétés de la bentonite. En particulier, une montmorillonite sodique est capable d'attirer entre ses feuillets beaucoup plus d'eau qu'une calcique. On observe qu'une bentonite sodique naturelle peut gonfler dans l'eau jusqu'à 18 fois son volume initial, alors qu'une calcique naturelle gonflera de 4 fois environ.

Outre la montmorillonite qui reste généralement le principal constituant (60% au minimum), la bentonite contient d'autres minéraux tels que le quartz, le mica, le feldspath, la pyrite, la goethite et même d'autres fractions argileuses de la famille des kaolinites, illites, etc.

La couleur est fortement influencée par la teneur en oxydes métalliques. Elle peut varier du vert au rose, en passant par les tons gris ou blancs.

### Traitement des bentonites

La propriété de gonflement des bentonites en présence d'eau est mise à profit pour réaliser des étanchéités artificielles. Ce matériau est utilisé en couches minces sous forme de produits manufacturés, appelés géosynthétiques bentonitiques.

En Europe, les producteurs choisissent généralement d'utiliser une bentonite sodique naturelle, extraite principalement aux Etats-Unis, ou une bentonite européenne, initialement calcique, mais que l'on traite en usine pour la rendre sodique et améliorer ainsi son pouvoir de gonflement. Cette bentonite est alors dite "calcique activée".

L'activation est un processus chimique qui consiste en une permutation partielle des ions  $\text{Ca}^{2+}$  présents à la surface des feuillets de la montmorillonite par des ions  $\text{Na}^+$ . On réalise cette transformation par ajout d'un

sel de sodium, sous certaines conditions d'humidité et sous fort malaxage.

D'autres traitements peuvent en outre améliorer les propriétés de résistance chimique des bentonites, comme l'adjonction de polymères.

Qu'elles soient naturelles ou activées, les bentonites font l'objet, après séchage, d'un broyage conduisant à des granulométries variables et adaptées à différents emplois.

L'annexe B précise cette description des bentonites.

### 2.2.1.2 Géotextiles

Les géotextiles sont des matériaux textiles constitués d'un ensemble de fibres synthétiques perméable à l'eau et à l'air, employés dans le domaine du génie civil et de la géotechnique, en contact avec des sols ou d'autres matériaux de construction (voir les fascicules du C.F.G. spécifiques aux géotextiles).

Dans le cas des géosynthétiques bentonitiques, les géotextiles se limitent aux fonctions suivantes :

- séparation,
- renforcement,
- protection,
- fonction "conteneur".

Les principales familles de géotextiles sont :

- les géotextiles tissés qui sont, en règle générale, obtenus par l'entrecroisement à angle droit de deux ou plusieurs systèmes de fils, fibres, filaments, bandelettes ou d'autres éléments,
- les géotextiles non-tissés qui sont constitués de fibres courtes ou de filaments continus répartis de manière aléatoire et dont la cohésion est assurée par un traitement de liaison chimique, thermique ou mécanique (aiguilletage),
- les géotextiles tricotés qui sont composés de fibres d'armatures longitudinales déposées de manière perpendiculaire sur des fibres d'armatures transversales. Celles-ci sont liées par un fil de couture aux points d'intersection.

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 polyester, le polypropylène, le polyamide, le polyéthylène et l'aramide.

### 2.2.1.3 Géofilms

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

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

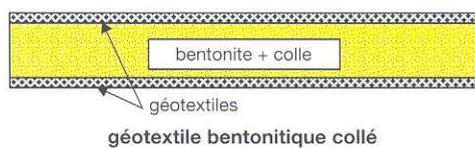
## 2.2.2 Différents types de géosynthétiques bentonitiques

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 2.2.2.4.

### 2.2.2.1 Géotextiles bentonitiques collés

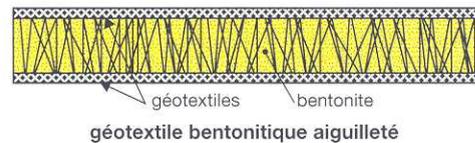
Les géotextiles bentonitiques collés (actuellement disponibles) sont composés de deux géotextiles entre lesquels se trouve une couche de bentonite. L'ensemble est maintenu par une colle hydro-soluble.



### 2.2.2.2 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.

Lors de l'aiguilletage, les fibres d'un des géotextiles sont ancrées dans l'autre géotextile en traversant la couche de bentonite.

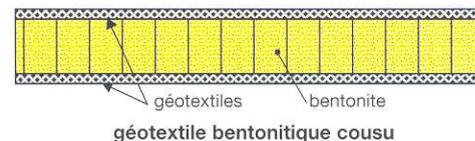


### 2.2.2.3 Géotextiles bentonitiques cousus

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 couture ou de liens.

Certains produits intègrent un géotextile intermédiaire servant de réservoir à la bentonite. D'autres produits maintiennent la bentonite par une colle hydro-soluble.



### 2.2.2.4 Géofilms bentonitiques

Les géofilms bentonitiques sont composés d'un géofilm (voir définition § 2.2.1.3), d'une couche de bentonite et éventuellement d'un géotextile.

L'ensemble est maintenu par une colle hydro-soluble et/ou par couture.



## 2.3 - 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 et l'hydratation de la bentonite et ainsi obtenir le niveau d'étanchéité requis. La contrainte minimale est de 5 kPa (correspondant à une épaisseur minimale de la structure de confinement et de protection de 0,25 m pour une densité de 2). Dans tous les cas la contrainte minimale apportée sur le G.S.B. par la structure de confinement et de protection doit être examinée lors de la conception de l'ouvrage,
- d'empêcher les différentes agressions susceptibles d'endommager le G.S.B. (agressions mécaniques, vandalisme, etc.),
- d'apporter les conditions de lestage en vue de répondre aux éventuelles sous-pressions.

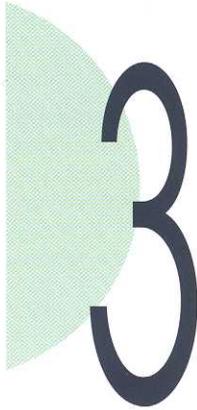
La structure de protection et de confinement peut être constituée par des matériaux naturels sélectionnés ou par des éléments préfabriqués.

Dans le cas de l'utilisation d'éléments préfabriqués, il y a lieu de s'assurer de la continuité de l'étanchéité au droit des joints.

Dans le cas de l'utilisation de matériaux granulaires, la couche en contact avec le G.S.B. devra respecter les recommandations suivantes afin d'obtenir la répartition la plus uniforme de la contrainte de confinement :

- dimension des plus gros éléments  $\leq 40$  mm,
- coefficient d'uniformité du matériau est supérieur à 10,
- le matériau ne doit pas présenter de granulats de formes agressives susceptibles de nuire aux fonctions du G.S.B.

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



# CONCEPTION ET MISE EN OEUVRE DU DISPOSITIF D'ETANCHEITE PAR GEOSYN- THETIQUES BENTONITIQUES

## 3.1 - GENERALITES

Les notions relatives à la conception et à la mise en œuvre des G.S.B. 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 D.E.G.B. 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 en recherchant des conditions économiques acceptables.

Il n'y a donc pas de solution unique pour la structure d'un D.E.G.B.

Dans tous les cas, la solution retenue cherche à optimiser le coût du D.E.G.B. dans son ensemble.

Les méthodes de dimensionnement du D.E.G.B. 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 D.E.G.B. 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 G.S.B. (§ 3.2.2 tableau : "emplois et fonctions des G.S.B."),
- identification des caractéristiques associées aux fonctions des G.S.B. (§ 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 G.S.B.").

Les caractéristiques des G.S.B. identifiées lors de la conception du D.E.G.B. 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 G.S.B. ne doivent pas avoir de fonction de renforcement,
- la conception du D.E.G.B. ne doit pas autoriser le développement d'efforts de traction et de cisaillement importants dans le G.S.B. en service,
- les G.S.B. ne remplissent la fonction d'étanchéité qu'en présence de la structure de confinement,
- les G.S.B. 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 D.E.G.B.

#### 3.2.1.1.1 Talus

Le G.S.B. 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. En général, on préfère placer les G.S.B. sur des pentes douces, inférieures à 2 H/1 V.

Les pentes faibles favorisent la réalisation correcte du D.E.G.B., 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 portant sur les caractéristiques des différentes couches du D.E.G.B. 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 G.S.B. (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 G.S.B.

#### 3.2.1.1.2 Crêtes des talus

Les crêtes des talus ou les risbermes doivent être dimensionnées suivant l'ouvrage et les conditions d'accessibilité (voir § 3.3.3.5).

#### 3.2.1.1.3 Fond de forme - structure support

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

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 2 %).

### 3.2.1.2 Conditions climatiques

En général les G.S.B. sont recouverts à l'avancement lors de la mise en œuvre (couche de confinement, géomembrane, etc.). Dans ce cas leur tenue aux U.V. est sans incidence sur la durabilité du G.S.B. Dans des situations particulières, prévues et contrôlées, où le confinement est différé, l'incidence des U.V. sur le G.S.B. doit être examinée.

La pose des G.S.B. par temps de pluie n'est pas recommandée. Dans le cas exceptionnel où elle est envisagée, elle doit être définie contractuellement et uniquement après avoir fait l'objet d'un examen spécifique.

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 G.S.B.

Lorsque les effluents liquides drainés viennent en contact avec le G.S.B., 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, après une étude géotechnique et hydrogéologique approfondie.

Cette étude précisera par exemple :

- les caractéristiques de perméabilité des sols et matériaux concernés,
- les niveaux extrêmes de la nappe phréatique,
- le risque de formation d'une nappe d'eau temporaire.

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

Lorsque l'action des rongeurs est possible, il est souhaitable qu'un dispositif de protection soit mis en place (exemples : grillage métallique, matériaux granulaires, etc.).

### 3.2.1.5 Tassement des structures supports

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

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

- a) réaliser une structure support limitant les effets de ces phénomènes, en particulier vis-à-vis des mouvements différentiels,
- b) substituer ou purger localement les matériaux compressibles ou gonflants,
- c) augmenter l'épaisseur de la structure support,
- d) renforcer la structure support par compactage, renforcement par géotextiles (voir le fascicule du C.F.G. : "Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre) ou d'autres techniques,
- e) tenir compte des tassements prévus pour dimensionner le G.S.B. : largeur de recouvrement des lés, résistance/déformation du G.S.B., etc.

Lorsque l'un des choix a), b), c) ou d) 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 D.E.G.B. (drains par exemple) posées sur une assise déformable, doivent faire l'objet d'une étude préalable.

La conception et la réalisation des différents raccordements du G.S.B. 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 G.S.B.

Dans tous les cas le G.S.B. 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.

### 3.2.1.7 Poinçonnements

Le D.E.G.B. doit être conçu de telle sorte que le G.S.B. ne puisse être poinçonné, en particulier sous les sollicitations suivantes :

- poinçonnements 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.

Lorsque, sous charges localisées, la capacité de conteneurisation du G.S.B. est suffisante, la capacité d'auto-cicatrisation du G.S.B. limite les effets du poinçonnement mécanique sur l'étanchéité du D.E.G.B.

En aucun cas, cette capacité ne doit justifier une conception dans laquelle le poinçonnement du G.S.B. serait prévu dans le déroulement normal du chantier.

- poinçonnements hydrauliques : la pression hydrostatique créée par un liquide stocké est totalement reprise par la structure support. Pour cela la structure support doit être suffisamment fermée afin de permettre un bon contact mécanique avec le G.S.B. (voir § 2.3).

Pour ces deux types de poinçonnement, il est possible de définir des solutions permettant 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 Ecoulement d'un liquide (canal, zone d'alimentation d'un bassin, lagune aérée, etc.)

Lorsque l'écoulement d'un liquide provoque sur les parois de l'ouvrage des solli-

citations dues aux efforts tangentiels et aux turbulences, la structure de confinement doit être dimensionnée également pour protéger la structure d'étanchéité (protection mécanique et hydraulique).

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

### 3.2.1.9 Vagues et batillage

Les vagues ou le batillage créés par le passage d'un bateau ou par le vent provoquent sur la berge un ensemble de sollicitations hydrodynamiques alternées.

La structure support et la structure de confinement et/ou de protection doivent être correctement dimensionnées pour pouvoir résister à ces sollicitations.

Des géosynthétiques peuvent être utilisés pour protéger le D.E.G.B. (filtration, érosion).

### 3.2.1.10 Débit de fuite admissible

La structure du D.E.G.B. dépend du débit de fuite admissible en exploitation. Celui-ci dépend de considérations économiques et hydrauliques, mais aussi des risques encourus en cas de fuite (pollution ou déstabilisation du sol de fondation).

Dans le cas où ces risques sont importants, on peut prévoir une double étanchéité voire un système composite associant des couches de sols de faible perméabilité, des géomembranes et des G.S.B.

### 3.2.1.11 Agressions chimiques

Il faut veiller à ce que les produits stockés, retenus ou transportés ne puissent aggraver chimiquement le D.E.G.B. Pour ce faire, on choisit des G.S.B. un niveau d'hydratation et une structure de protection adéquats. Ceci peut parfois nécessiter des essais de compatibilité préliminaires. En particulier, l'impact des environnements calciques (calcaire, gypse, etc.) sur les G.S.B. doit être examiné pour s'assurer de la durabilité des caractéristiques de la bentonite. A titre d'exemple, la perméabilité d'un G.S.B. contenant une bentonite sodique (naturelle ou artificielle) peut évoluer de façon non négligeable au contact d'un environnement calcaire (voir annexe B § IV 4).

Les conditions d'exploitation de l'ouvrage doivent être définies dès l'origine du projet et respectées dans le temps. La compatibilité chimique des produits contenus non prévus initialement doit faire l'objet d'une vérification complémentaire (exemples : sels de déverglaçage, hydrocarbures, etc.). Ainsi, il y a lieu d'évaluer les conséquences sur le D.E.G.B. d'une arrivée accidentelle d'effluents dont les caractéristiques ne correspondraient pas à celles des liquides habituellement transportés ou stockés (par exemple : déversements dans un fossé situé en bordure de route et normalement conçu pour recueillir les eaux d'écoulement ou de ruissellement).

#### **3.2.1.12 Exigences sanitaires ou biologiques**

Le choix des G.S.B. doit tenir compte des contraintes sanitaires et écologiques (faune, flore), lorsqu'elles sont réglementaires ou spécifiées contractuellement.

#### **3.2.1.13 Vandalisme**

Pendant les phases de construction on tiendra compte du risque de vandalisme.

#### **3.2.1.14 Végétation**

Les racines venant en contact d'un G.S.B. 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,
- mettre le G.S.B. hors d'atteinte des racines par le choix d'une couche de protection et de confinement d'épaisseur et de nature adaptées,
- interposer éventuellement entre les végétaux et le G.S.B. un niveau anti-racines adapté (couche drainante, géotextiles, etc.),
- sélectionner des espèces végétales dont le développement racinaire se satisfasse de l'épaisseur de terre rapportée prévue au projet,
- entretenir régulièrement l'ouvrage (arrachage, tonte, etc.) pour maîtriser le développement de la végétation.

On pourra se référer utilement à des experts compétents (paysagistes, entreprises spécialisées, etc.) pour définir le contenu de ces actions préventives.

#### **3.2.1.15 Trafic**

Si l'ouvrage doit supporter un type de trafic déterminé (route, autoroute, etc.), la structure de confinement et de protection doit être dimensionnée en conséquence.

#### **3.2.1.16 Curage, entretien**

Les opérations de curage et d'entretien (ceci s'applique aussi à la végétation) qui surviendront au cours de la vie normale de l'ouvrage doivent être appréhendées dès la conception du D.E.G.B.

L'entretien peut conduire à reconstituer localement la structure de protection et de confinement ayant subi une érosion.

Les matériaux de la couche de confinement doivent être adaptés pour permettre ces opérations.

#### **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 G.S.B. conduisent le concepteur à définir pour chacun des matériaux constitutifs du D.E.G.B. la ou les fonctions attendues.

Les G.S.B. 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). Ce dernier assure dans ce cas la seule fonction d'étanchéité.

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. Dans ce cas, le géosynthétique bentonitique peut assurer les fonctions d'étanchéité, de réparation et de protection.

L'identification des caractéristiques des G.S.B. résulte d'une démarche en deux temps :

- premièrement : identification des "fonctions" à partir de "l'emploi" des G.S.B. dans l'ouvrage (voir tableau "emplois et fonctions des géosynthétiques bentonitiques" ci-dessous),
- deuxièmement : identification des "caractéristiques à considérer" à partir des "fonctions" retenues (voir tableaux "caractéristiques à considérer" p. 18 et p. 19).

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

- caractéristiques fonctionnelles des G.S.B. : ce sont les caractéristiques minimales qu'ils doivent présenter pour assurer leurs fonctions dans l'ouvrage,
- caractéristiques de mise en œuvre des G.S.B. : 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 G.S.B. : ce sont les caractéristiques minimales qu'ils doivent présenter pour que leurs fonctions soient assurées tout au long de la vie de l'ouvrage. Cette durée fait partie des hypothèses de l'étude.

Le premier tableau ci-dessous définit les fonctions que peuvent assurer les géosynthétiques bentonitiques compte tenu de leur emploi. Les tableaux qui suivent définissent les caractéristiques des G.S.B. en tenant compte de la fonction assurée et des exigences de mise en œuvre et de durabilité.

La fonction "réparation" est définie comme l'aptitude des géosynthétiques bentonitiques à colmater et limiter une fuite ponctuelle sur l'élément principal d'étanchéité (cas des étanchéités combinées), voir **figures 2a et 2b**.

Cette fonction est différente de la caractéristique "autocicatrisation" citée dans les tableaux ci-après. La caractéristique auto-cicatrisation est définie comme la capacité des géosynthétiques bentonitiques à colmater et limiter un débit de fuite ponctuelle au droit d'une perforation accidentelle ou d'un défaut de faibles dimensions (quelques millimètres) du géosynthétique bentonitique (cas des étanchéités simples ou combinées), voir **figures 2b et 2c**.

L'aptitude à l'autocicatrisation doit être examinée en tenant compte de l'environnement du G.S.B. (D.E.G.B., état hydrique, conditions de mise en œuvre, exploitation de l'ouvrage).

## EMPLOIS ET FONCTIONS DES GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES

Emplois des G.S.B.	Fonctions recherchées
Etanchéité simple	Etanchéité
Etanchéité combinée	Etanchéité Réparation* Protection*

\* fonction éventuellement recherchée

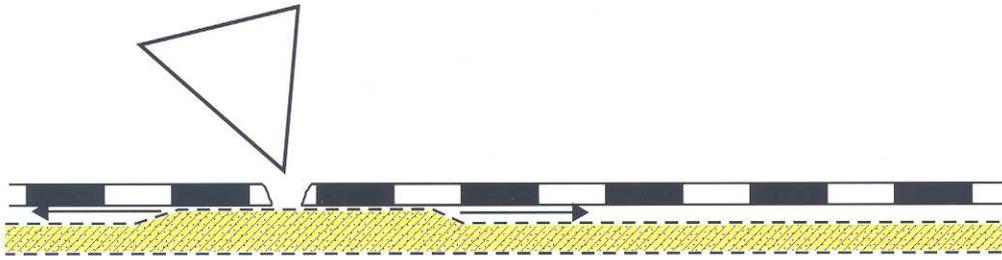


Figure 2a : Fonction "Réparation": transmissivité d'interface géomembrane-G.S.B.

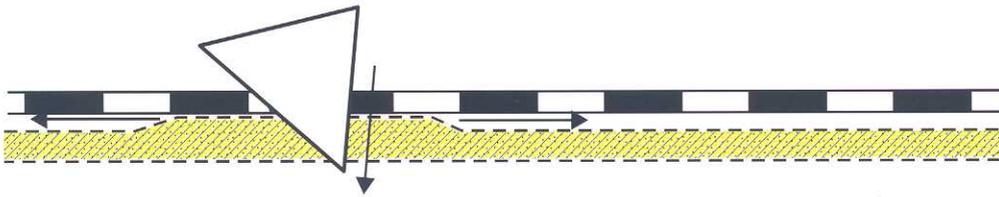


Figure 2b : Fonction "Réparation" et capacité "d'autocicatrisation" : transmissivité d'interface géomembrane-G.S.B. et débit de fuite au travers du défaut

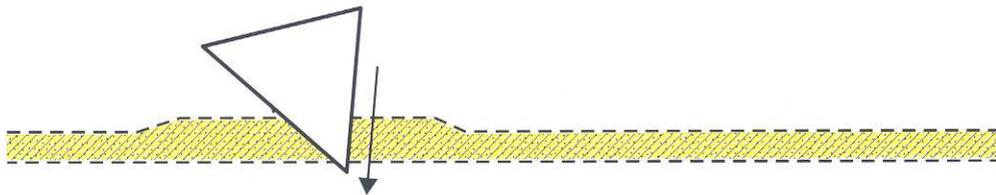


Figure 2c : Capacité "d'autocicatrisation" : débit de fuite au travers du défaut

Les tableaux qui suivent définissent les caractéristiques des G.S.B. en tenant compte de la fonction assurée 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 :

- une valeur quantifiée (seuil) et mesurable,
- une exigence technique éventuellement validée par une planche d'essais.

"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.

## CARACTERISTIQUES FONCTIONNELLES A CONSIDERER

Eléments concernés	FONCTIONS		
	Etanchéité	Réparation*	Protection*
<b>géosynthétique</b>	ouverture de filtration (A)		
<b>bentonite</b>	granulométrie à sec (A) valeur de bleu (N) absorption d'eau (N) pouvoir de gonflement (N) minéralogie (N)	pouvoir de gonflement (N)	
<b>G.S.B.</b>	retrait (A) autocicatrisation (A) masse de bentonite par unité surfacique de G.S.B. (N) masse surfacique du G.S.B. (A) épaisseur (A) perméabilité [1] sous contrainte (N) gonflement sous contrainte de confinement (N) frottements (A) cisaillement interne (A) pelage (A) perméabilité des joints (N) traction (A) conteneurisation (A)	souplesse (A)	poinçonnement statique (A)
<b>D.E.G.B.</b>	stabilité du D.E.G.B. sur pente (étude géotechnique) (N)** conteneurisation (A)	débit de fuite sur perforation amorcée (N)	poinçonnement statique (N) poinçonnement dynamique (N)

\* Cette fonction n'est applicable qu'en étanchéité combinée.

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

[1] La notion de perméabilité appliquée aux G.S.B. dont l'épaisseur est limitée et connue est traduite en flux traversant le plan du G.S.B. (permittivité).

## CARACTERISTIQUES DE MISE EN OEUVRE A CONSIDERER

Eléments concernés	FONCTIONS		
	Etanchéité	Réparation*	Protection*
<b>géosynthétique</b>	ouverture de filtration (A)		
<b>bentonite</b>	teneur en eau (N)	teneur en eau (N)	
<b>G.S.B.</b>	traction (N) dommage lors de la mise en œuvre (N) frottements (A) cisaillement interne (A) poinçonnement dynamique (N) traction sur joints (A) conteneurisation (A)	conteneurisation (N)	poinçonnement statique (A) dommage lors de la mise en œuvre (N) perforation dynamique (A)
<b>D.E.G.B.</b>	stabilité sur pente **(N) conteneurisation (A) perçement par granulats sur support rigide (A)		perçement par granulats sur support rigide (A) poinçonnement dynamique (A) poinçonnement statique (A)

\* Cette fonction n'est applicable qu'en étanchéité combinée.

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

## CARACTERISTIQUES DE DURABILITE A CONSIDERER

Eléments concernés	FONCTIONS		
	Etanchéité	Réparation*	Protection*
<b>géosynthétique</b>	résistance chimique (A) résistance U.V. (A)		résistance chimique (A) résistance U.V. (A)
<b>bentonite</b>	teneur en eau (A) vieillessement (N) minéralogie (N)	pouvoir de gonflement (A) teneur en eau (A)	
<b>G.S.B.</b>	cisaillement interne (A) traction (A) conteneurisation (A) résistance à la dégradation chimique, biologique, climatique (A)	conteneurisation (A)	résistance à la dégradation chimique, biologique (A) poinçonnement à long terme (A)
<b>D.E.G.B.</b>	stabilité sur pente **(N) poinçonnement statique (A)	débit de fuite sur perforation amorcée (A)	poinçonnement à long terme (A)

\* Cette fonction n'est applicable qu'en étanchéité combinée.

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

La durabilité du D.E.G.B. peut être définie comme étant la durée pendant laquelle ses matériaux constitutifs conservent leurs caractéristiques fonctionnelles, dans le cadre de l'étude.

### 3.2.3 Critères de choix des géosynthétiques bentonitiques

L'importance de l'examen des différentes caractéristiques définies au § 3.2.2 d'un G.S.B., est liée à la fonction qu'il assure dans un ouvrage.

Le tableau qui suit précise, pour les principaux cas d'utilisation des G.S.B. 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. Ces classements s'appliquent à des ouvrages courants.

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

Peu répandu, l'emploi des G.S.B. en "étanchéité simple" des "centres de stockage des déchets ménagers et

assimilés (C.S.D.)" s'appuie sur un retour d'expérience, en France, d'environ sept ans.

Il appartient au maître d'œuvre de s'assurer que l'utilisation des G.S.B. dans l'emploi cité ci-avant est conforme à la réglementation en vigueur et au fascicule n° 11 du C.F.G. Il convient donc d'être vigilant dans l'emploi des G.S.B. en étanchéité simple des C.S.D. Ceci conduit à la nécessité de démontrer l'équivalence de performance d'un D.E.G.B. à un dispositif d'étanchéité constitué de matériaux naturels ou synthétiques. Si cette équivalence ne peut pas être établie, l'emploi ci-dessus n'est pas recommandé.

Dans l'état actuel des connaissances cette équivalence est souvent difficile à argumenter par manque de retour d'expérience, d'essais, de pilotes expérimentaux, etc.

A titre informatif, les critères d'équivalence à considérer sont notamment :

- transport par convection et par diffusion des polluants,
- absorption, adsorption,
- compatibilité chimique,
- plus généralement les caractéristiques indiquées dans le tableau ci-après,
- etc.

Dans le tableau qui suit, le niveau d'importance de l'examen des principales caractéristiques des G.S.B. 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.

### IMPORTANCE DE L'EXAMEN DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES G.S.B.

désignation des ouvrages		propriétés hydrauliques							propriétés mécaniques					durabilité [1]			
		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	aptitude à la réparation	poinçonnement statique	poinçonnement dynamique	traction	allongement	cisaillement interne	frottement externe	gel-dégel	dessiccation	durabilité chimique
<b>centres de stockage de déchets [9]</b>																	
fond	étanchéité simple sous réserve du § 3.2.3	3	3	0	0	3	3	0	3	3	1	3	3[3]	3[3]	1[5]	0[4]	3
	étanchéité combinée	3	3	0	0	3	3	3	3	3	1	3	3[3]	3[3]	1[5]	0[4]	3
talus	étanchéité simple sous réserve du § 3.2.3	3	1	2	2	2	2	0	3	3	3	3	3	3	1[5]	2[6]	3
	étanchéité combinée	3	1	0	0	1	1	3	3	3	3	3	3	3	1[5]	1[6]	3
couverture [10]	pente <= à 5%	3	3	3	3	0	0	0	2	3	1	3	1	1	2	2	3
	pente > à 5%	3	3	3	3	0	0	0	2	3	3	3	3	3	2	2	3
<b>ouvrages hydrauliques (hors barrages)</b>																	
(étanchéité simple)																	
<b>ouvrages à niveau d'eau quasi-constant [11]</b>																	
	fond	3	3	0	0	3[7]	3[7]	0	3	3	1	3	1	1	1[2]	0	2
	talus	3	3	0	0	3[7]	3[7]	0	3	3	3	3	3	3	3	1	2
<b>ouvrages à niveau d'eau variable</b>																	
	fond	3	3	0	0	3[7]	3[7]	0	3	3	1	3	1	1	3	3	2
	talus	3	3	0	0	3[7]	3[7]	0	3	3	3	3	3	3	3	3	2
<b>ouvrages de protection de la nappe</b>		3	3	0	0	3[7]	3[7]	0	3	3	3[8]	3	3[8]	3[8]	3	3	2

[1] : La durabilité attendue des matériaux dépend de la durée de vie de l'ouvrage.

[2] : L'importance de cette caractéristique dépend de la hauteur d'eau dans l'ouvrage.

[3] : Cette caractéristique intervient lors du calcul de la stabilité des déchets (pendant et après exploitation) ou lors de la mise en œuvre du D.E.G.B. et des remblais.

[4] : Le fond est systématiquement recouvert par la couche de confinement.

[5] : Applicable aux projets concernés par cette sollicitation.

[6] : S'applique notamment en phases de construction et d'exploitation des C.S.D.

[7] : Le terme lixiviat couvre les eaux polluées (retenues, ruissellement, etc.).

[8] : Pour les protections subhorizontales de la nappe (pente ≤ 5%) l'importance de l'examen de cette caractéristique est de 1.

[9] : Voir § 3.2.3.

[10] : Concerne les couvertures utilisant des G.S.B. en étanchéité simple ou combinée.

[11] : Cette catégorie d'ouvrage concerne également ceux dont la fréquence des cycles "niveau haut-niveau bas" est suffisamment rapide pour que l'état hydrique du G.S.B. ne soit pas perturbé.

### 3.2.4 Essais

La stabilité des D.E.G.B. est vérifiée en particulier par l'étude géotechnique qui tient compte notamment des caractéristiques des G.S.B. et de toutes les interfaces du D.E.G.B. 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 D.E.G.B. passe par la maîtrise de celle du G.S.B. 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 G.S.B. Cependant l'annexe C propose pour chacune des caractéristiques citées au § 3.2.2 les textes relatifs :

- aux essais existants non normalisés, ou à développer (à ce jour : 1998),
- aux normes non applicables directement aux G.S.B. (à ce jour : 1998),
- aux normes applicables aux niveaux français (N.F.), européen (E.N.) ou international (I.S.O.).

L'annexe C identifie les normes qui sont directement applicables aux G.S.B. ou à l'un de ses composants (colonne "références des normes couvrant les G.S.B. ou leurs composants") et celles qui seraient applicables aux G.S.B. dans le principe moyennant une ou plusieurs des adaptations suivantes (colonne "références des normes ne couvrant pas les G.S.B.") :

- modification du principe de fabrication des éprouvettes ou de la prise d'échantillon soumis à l'essai,
- modification de la taille ou du volume de l'éprouvette ou de l'échantillon,
- modification du niveau de contrainte sur le G.S.B. pendant l'essai,
- identification de l'état hydrique du G.S.B. avant ou pendant l'essai,
- modification du principe d'interprétation des résultats d'essais.

D'autre part, les G.S.B. sont des produits manufacturés composites pour lesquels les

normes applicables peuvent être proches de celles des géomembranes ou des géotextiles suivant leur constitution. Ceci justifie pour une même caractéristique la référence à deux normes, l'une applicable aux géomembranes et l'autre applicable aux géotextiles.

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 reproduisent d'assez près les 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.

## 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 § 3.3.6).
- 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 Fond de forme**

#### **3.3.1.1 Végétation**

En complément aux indications des paragraphes 3.2.3 et 3.2.4, le fond de forme doit être dégagé de toute végétation et terre végétale et purgé d'éventuels dépôts superficiels de matières organiques.

On évite ainsi le contact direct des souches et des racines avec le D.E.G.B. 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 G.S.B. (voir § 3.2.1.11).

#### **3.3.1.2 Compactage**

Le fond de forme doit être compacté en respectant les règles définies par l'étude de mécanique des sols pour l'ouvrage considéré.

Les remblais récents (remblaiement de carrière ou de décharge par exemple) nécessitent un compactage particulier pour limiter les tassements ultérieurs (voir § 3.2.1.5) et la sensibilité à l'érosion interne (voir § 3.2.1.6).

Lorsque la nature du terrain en place lui permet de faire office de structure support, sans apport de matériaux supplémentaires, les critères d'exécution du fond de forme doivent également respecter les prescriptions ci-après relatives à la couche support et aux drainages. Pour les ouvrages en remblai, l'état de surface requis est obtenu soit par compactage suivant la ligne de plus grande pente des talus, soit par la méthode du remblai excédentaire. Toutefois, on vérifie lors du chantier que des variations locales des caractéristiques du terrain n'imposent pas la réalisation ponctuelle d'une couche support rattachée.

### **3.3.2 Structure support**

#### **3.3.2.1 Couche de forme**

Sa mise en œuvre doit obéir aux mêmes prescriptions que celles du fond de forme.

De plus, la couche de forme doit présenter une portance et une régularité de surface équivalentes à la couche support (voir § 3.3.2.2) si elle a ce rôle.

#### **3.3.2.2 Couche support**

Dans le cas où la couche de forme est inadaptée, une couche support est réalisée avec un matériau d'apport dont la surface en contact avec le G.S.B. est fermée (sable, grave, matériau lié, géosynthétiques, etc.).

Il est nécessaire :

- d'adapter la granulométrie du matériau d'apport au G.S.B.,
- de veiller à ne pas créer de ségrégation du matériau d'apport lors de son transport et de sa mise en œuvre,
- de contrôler, après compactage (voir § 3.3.1.2), l'état de surface et retirer tout élément agressif.

Les matériaux pulvérulents, sensibles au ravinement, à la circulation de chantier et au battillage, 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.

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.

La couche support peut comprendre des géotextiles anti-poinçonnants et/ou drainants et/ou filtrants adaptés au D.E.G.B. Leur mise en œuvre est réalisée suivant les prescriptions des fascicules du C.F.G. correspondants.

La structure support doit être exempte de flaque d'eau lors de la mise en œuvre de la structure d'étanchéité.

### **3.3.3 Structure d'étanchéité**

#### **3.3.3.1 Conditionnement**

Les G.S.B. doivent être commercialisés en rouleaux protégés par un emballage étanche.

Chaque rouleau porte un étiquetage précis permettant son identification et un contrôle de suivi de la qualité lors de la fabrication.

### 3.3.3.2 Stockage et transport

Toutes précautions doivent être prises pour ne pas endommager le G.S.B. 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),
- mettre en place, en cas de stockage prolongé, une protection complémentaire contre les agressions climatiques (pluie, U.V.).

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 G.S.B. seront rejetées.

### 3.3.3.3 Plans de pose et de récolement

Le maître d'œuvre ou l'entrepreneur doit établir un plan de pose indiquant :

- le sens de déploiement des géosynthétiques,
- la localisation de l'assemblage des différents lés, en tenant compte de la géométrie prévue de l'ouvrage. S'il y a lieu le plan de pose indique le sens de drainage, le sens chaîne et le sens trame des géosynthétiques de drainage ou de renforcement,
- 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.

Lors de l'installation des géosynthétiques bentonitiques, un plan de récolement permettra de mémoriser le positionnement réel

des lés, les positions des réparations, les points singuliers, les prélèvements d'échantillons, etc.

### 3.3.3.4 Mise en place

La mise en place des G.S.B. comprend, dans l'ordre, les opérations suivantes :

- approvisionnement et stockage,
- déroulage, positionnement,
- mise en recouvrement des lés,
- ancrages,
- raccordements aux ouvrages singuliers,
- structure de confinement et de protection.

#### **3.3.3.4.1 Manutentions**

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

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.

#### **3.3.3.4.2 Déroulage**

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.

On doit veiller en particulier à :

- respecter les largeurs minimales de recouvrement,
- 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,
- positionner sur talus, la direction de pose suivant la ligne de plus grande pente,

- éviter sur talus tous les recouvrements horizontaux, dans le cas contraire ils devront faire l'objet d'une étude de faisabilité,
- interdire à tout véhicule de circuler sur le G.S.B., sauf dispositions particulières à justifier par l'entreprise auprès du maître d'œuvre.

Après positionnement des lés, et lorsque la mise en œuvre de la structure de protection et de confinement est différée, les géosynthétiques bentonitiques doivent être lestés afin de résister à l'effet du vent. Le poseur choisit en fonction des données particulières de l'ouvrage, le lestage qui est le mieux adapté en fonction des vents prévisibles. Le système de lestage ne doit pas nuire à l'intégrité du dispositif d'étanchéité (poinçonnement).

#### 3.3.3.4.3 Mise en recouvrement des lés

Un recouvrement des lés est nécessaire pour assurer la continuité de l'étanchéité du D.E.G.B. et permettre l'adaptation du G.S.B. à la structure support lors de la mise en œuvre de la structure de confinement et de protection.

Les valeurs des recouvrements sont :

- dans le sens de la longueur des lés (en bordure) : usuellement comprises entre 15 cm et 30 cm. Plus généralement la valeur retenue est de 20 cm, cependant cette valeur doit être examinée par le maître d'œuvre au regard des spécificités du projet,
- aux extrémités des rouleaux : au moins 40 cm pour compenser, en complément de l'adaptation du G.S.B. au support, les éventuels défauts d'extrémité (perte de bentonite, effets des moyens de mise en œuvre, etc.).

Dans le cas de tassements différentiels prévisibles importants (C.S.D.) la largeur du recouvrement devra être redéfinie et adaptée.

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 figure 3**). En général on évite les recouvrements quadruples. Lorsque l'on ne peut les éviter, ils doivent faire l'objet d'un examen spécifique.

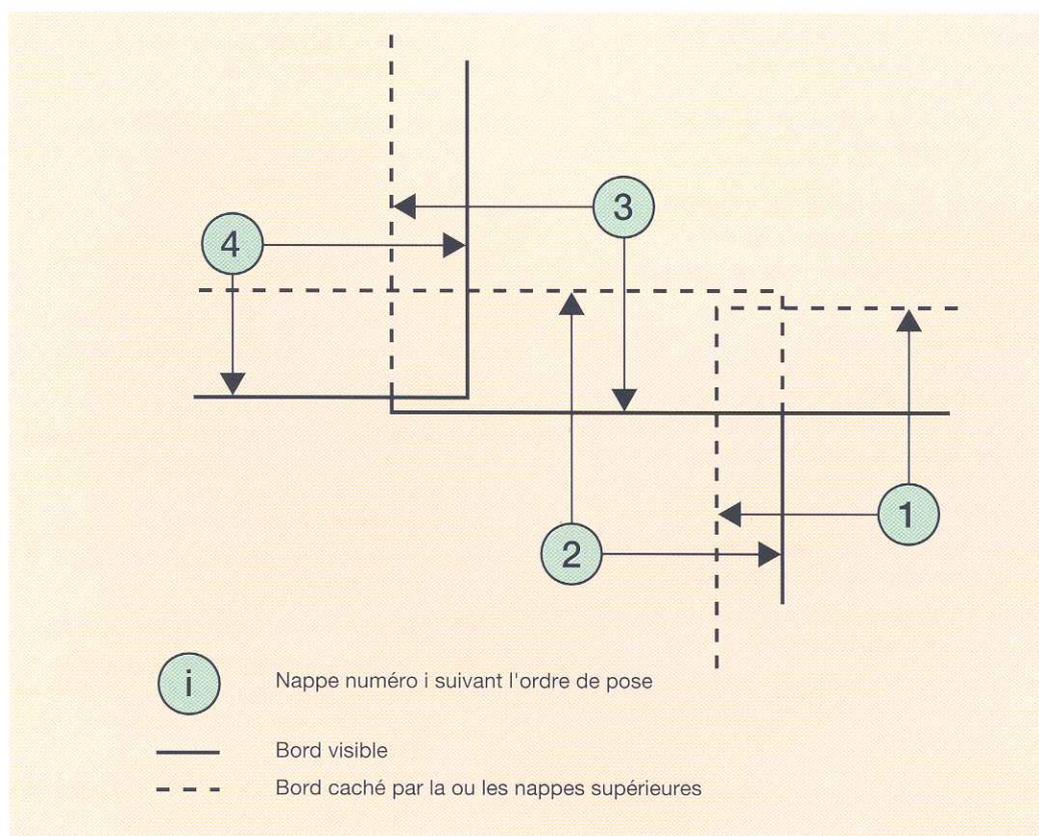


Figure 3 : 2 points triples

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

- que tous les lés soient parfaitement tendus de façon à effacer tous les plis et irrégularités,
- 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.

L'étanchéité de la zone de recouvrement propre et plane sera assurée par la présence ou l'apport de bentonite granulaire ou en poudre ou en pâte, voire de colle (voir figure 4).

Il pourra être nécessaire, dans certains cas, de réaliser une protection de ce joint par apport de matériaux (voir figure 5) pour éviter la dispersion de la bentonite sous l'action du vent, de l'eau de pluie, ou de sollicitations mécaniques.

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.

### 3.3.3.5 Ancrages

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,
- 3 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 fichage du G.S.B. sur le talus ou en tête (épingles dans un support meuble),
- le chevillage d'un profilé plaquant le G.S.B. sur un support rigide.

#### 3.3.3.5.1 Ancrage en tête

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

L'expérience montre qu'il est parfois nécessaire que le G.S.B. soit maintenu provisoirement en tête de talus par un lestage ponctuel avant la mise en œuvre du maté-

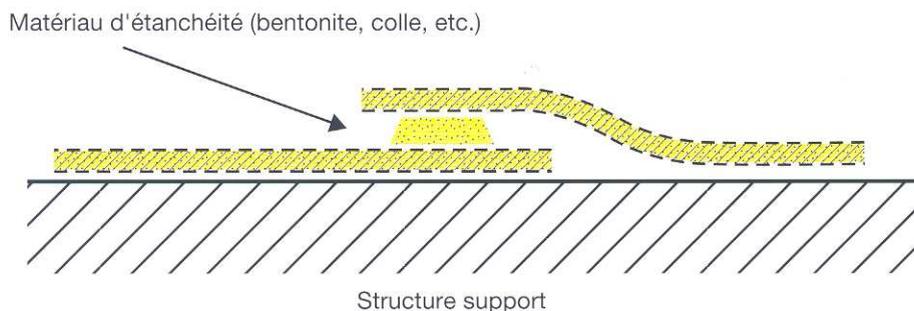


Figure 4 : Recouvrement avec apport de bentonite ou de colle

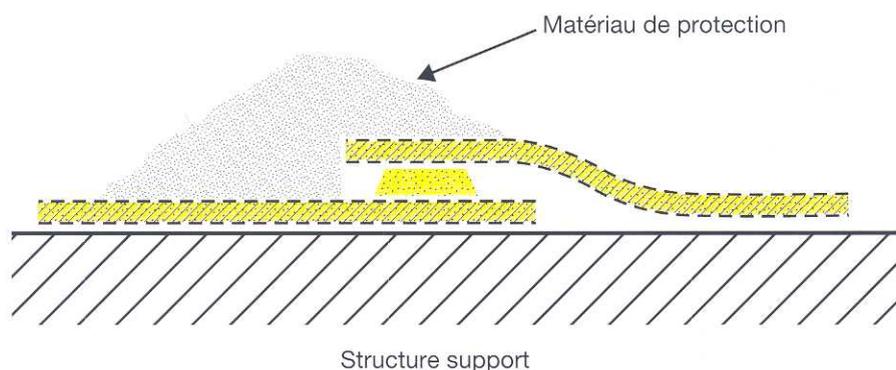


Figure 5 : Recouvrement avec protection par apport de matériau

riau 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 6).

D'autres solutions par lestage sont également pratiquées, selon la figure 7, 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 D.E.G.B.

### 3.3.3.5.2 Ancrage intermédiaire

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 8, 9 et 10.

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

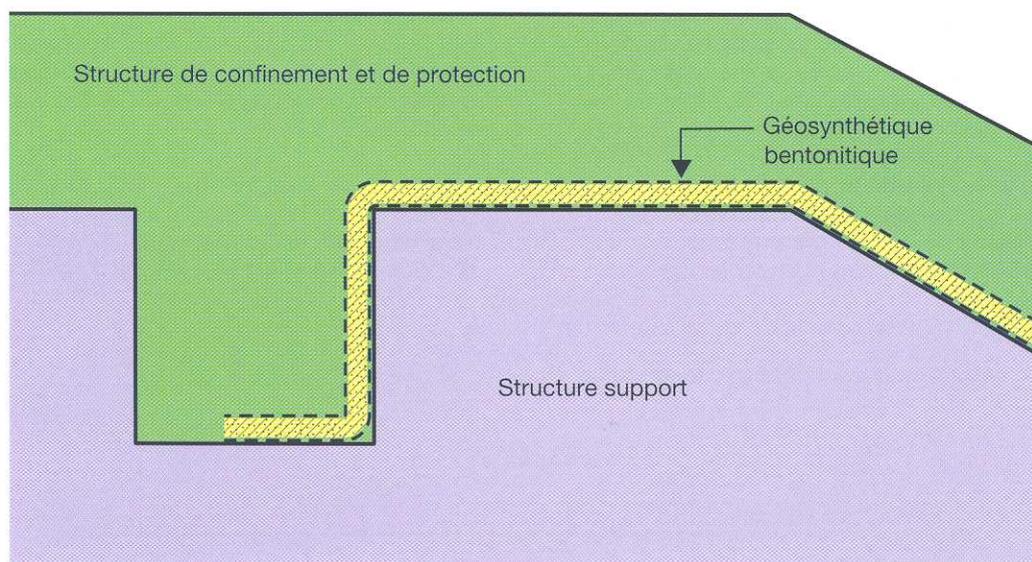


Figure 6 : Ancrage en tête par enfouissement dans une tranchée

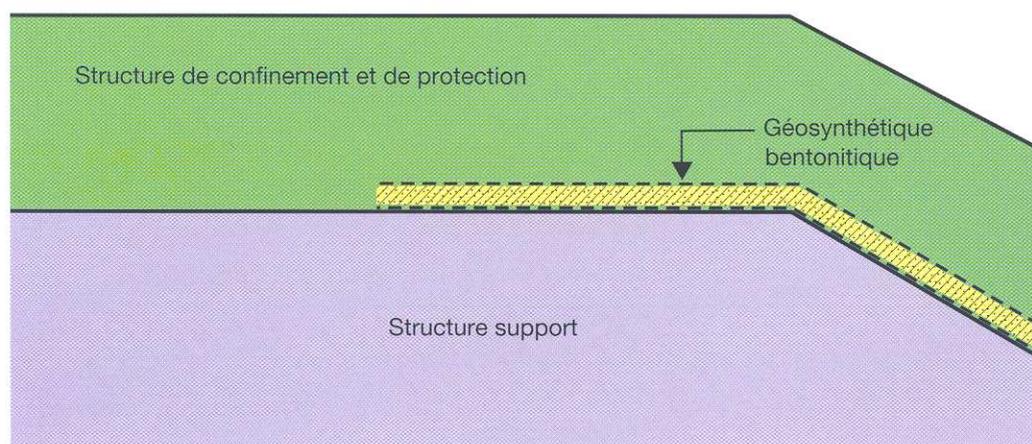


Figure 7 : Ancrage en tête par simple lestage

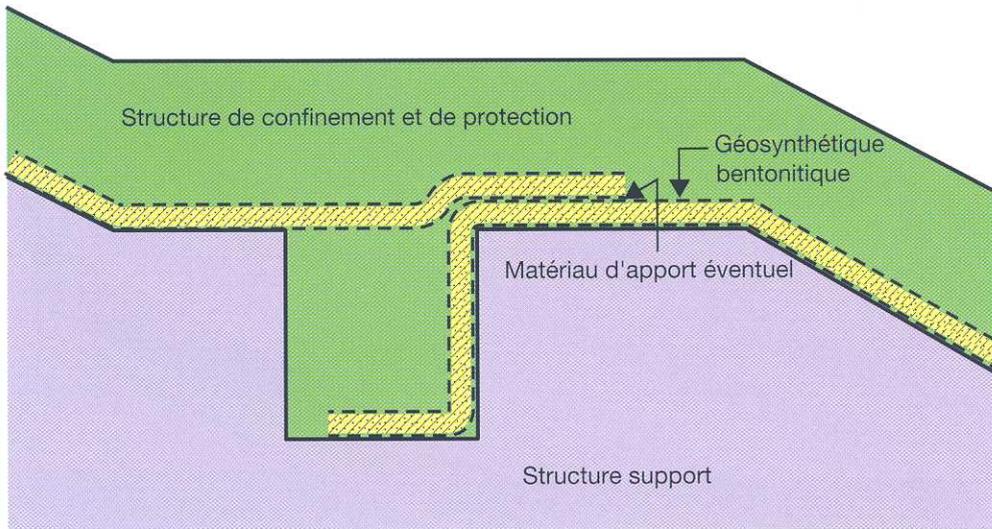


Figure 8 : Ancrage intermédiaire en tranchée avec joint

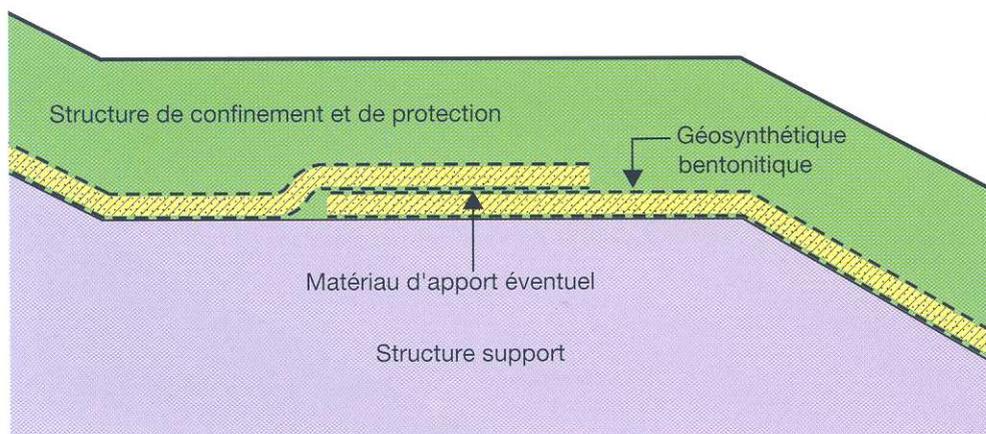


Figure 9 : Ancrage intermédiaire par lestage avec joint

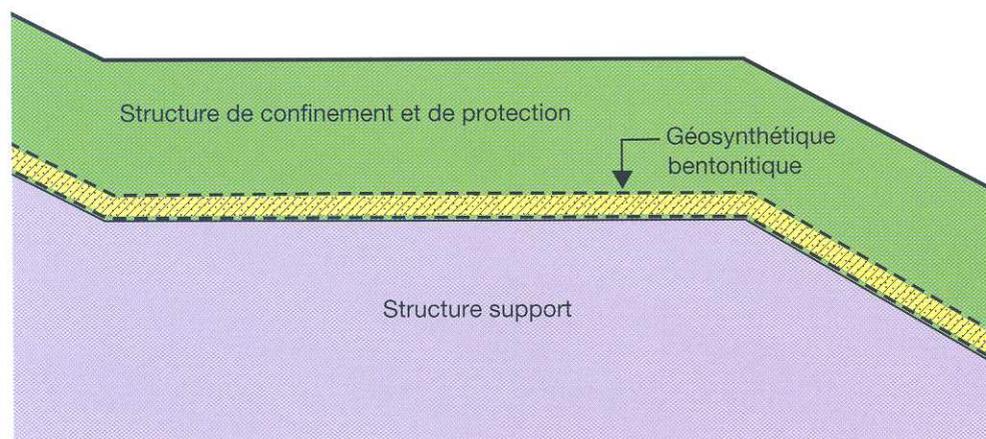


Figure 10 : Ancrage intermédiaire par lestage sans joint

p. 27

### 3.3.3.5.3 Ancrage en pied

L'ancrage en pied peut être prévu pour garantir la continuité de l'étanchéité entre le G.S.B. et l'horizon étanche à rejoindre.

Cet ancrage est réalisé suivant les principes représentés par les figures 11 et 12.

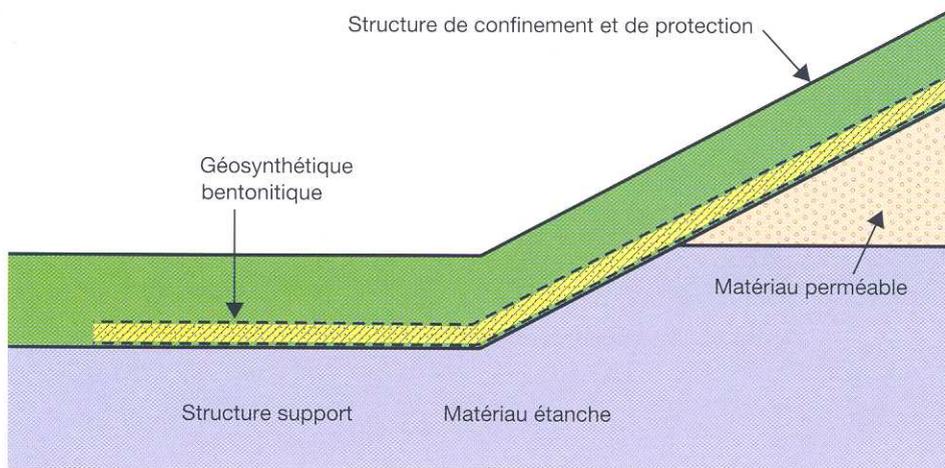


Figure 11 : Raccord horizontal en pied de talus

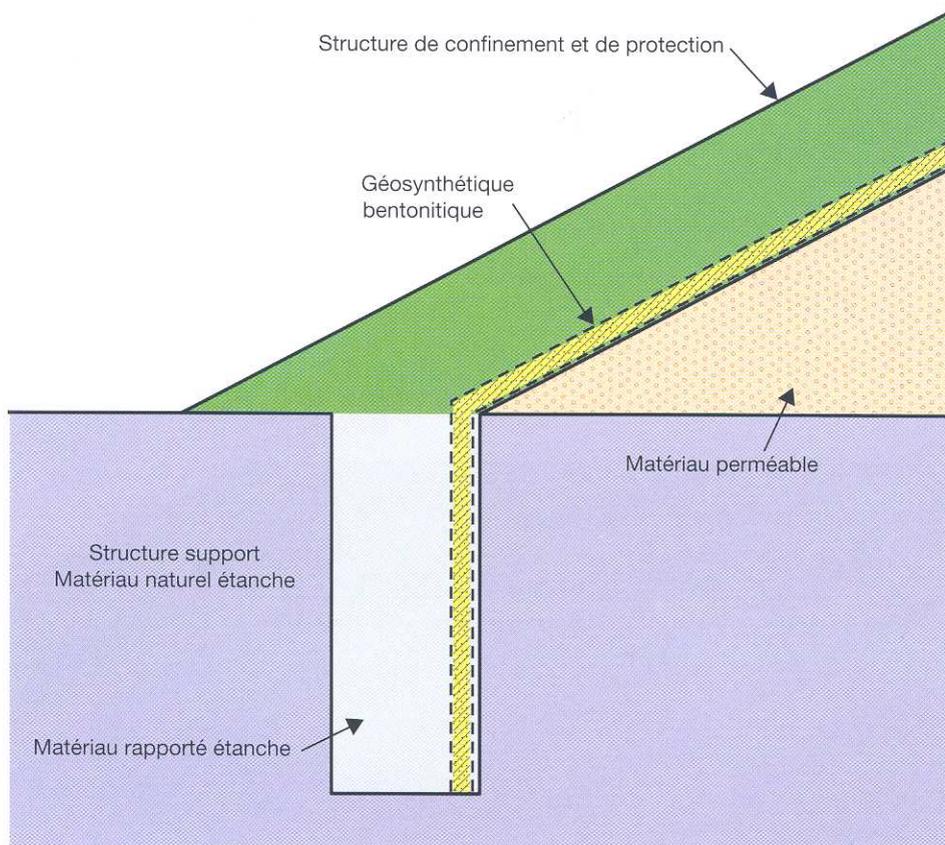


Figure 12 : Raccord en tranchée avec apport de matériau étanche

### 3.3.3.6 Raccordements aux ouvrages annexes

Par expérience, le compactage des remblais autour des points singuliers est souvent insuffisant car difficile à réaliser sauf pour les ouvrages coulés en pleine fouille dans un remblai ; les zones de raccordement sont très souvent soumises à des tassements différentiels que le G.S.B. peut absorber sans rupture sous réserve de dispositions constructives adéquates (voir figure 13).

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

Principe général de raccordement :

Pour les G.S.B. l'étanchéité au droit du raccordement est assurée par serrage d'un réglet métallique inoxydable ou d'un profilé inaltérable (métal ou plastique) chevillé (voir figure 14). Cette zone de fixation n'a

pour but que de s'opposer à l'arrachement du G.S.B.

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. Un exemple est précisé par la figure 14.

La hauteur du matériau de confinement au dessus du point de fixation (notée H sur la figure 13) doit permettre d'obtenir une contrainte de confinement minimale (5 kPa, voir § 2.3) ou la contrainte de projet. A titre d'exemple pour obtenir 5 kPa de contrainte de confinement, il peut être nécessaire de prévoir une hauteur H de 50 cm.

Un principe général de raccordement aux canalisations sur pentes est précisé par la figure 15.

Dans le cas des ouvrages hydrauliques, il est recommandé de créer une zone stabilisée autour de la canalisation (massif béton, etc.).

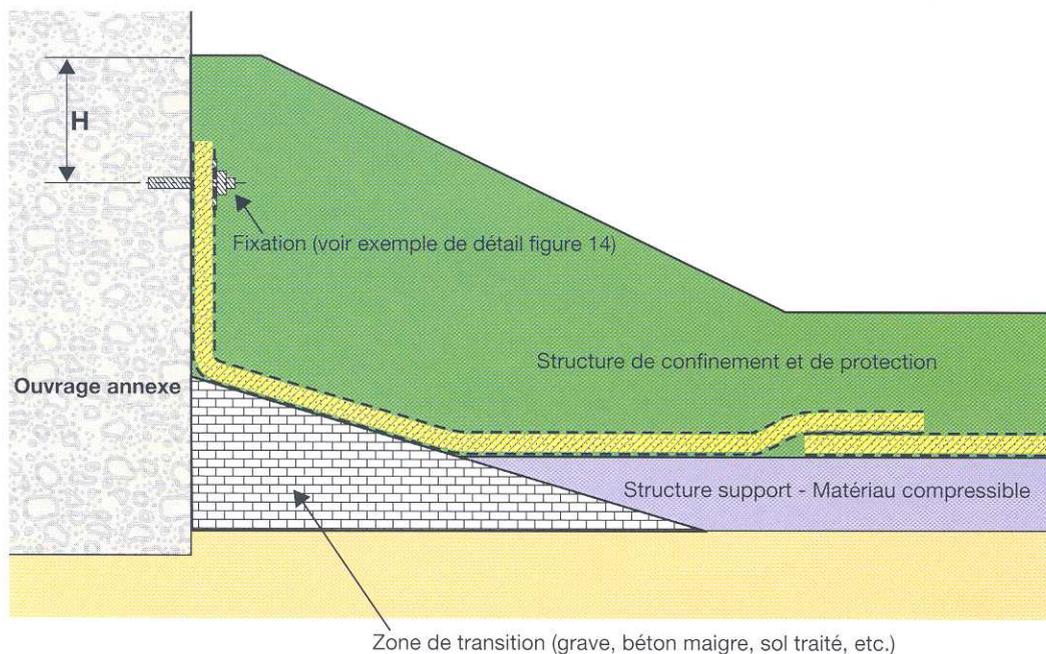


Figure 13 : Limitation des tassements différentiels dans les zones de raccordement aux ouvrages annexes (schéma de principe)

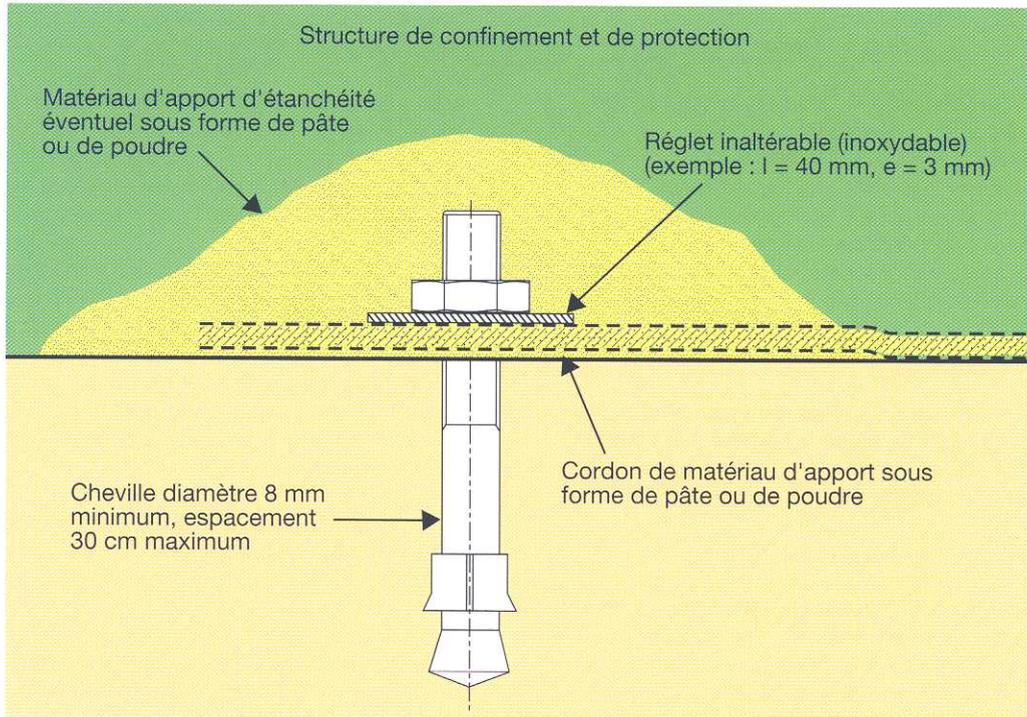


Figure 14 : Exemple de raccordement étanche sur un ouvrage annexe

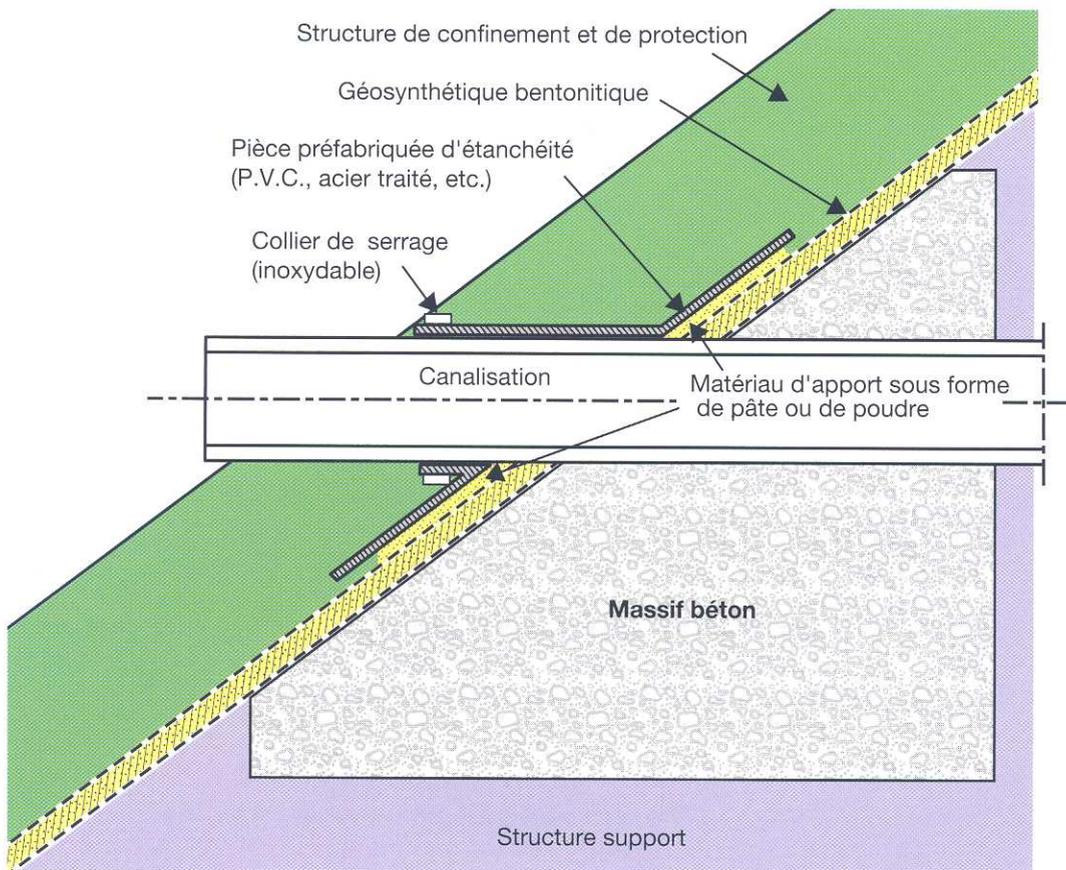


Figure 15 : Principe de raccordement étanche d'un géosynthétique bentonitique à une canalisation sur talus - solution par pièce rapportée préfabriquée avec collier de serrage

### **3.3.4 Structure de confinement et de protection**

#### **3.3.4.1 Généralités**

Le confinement du G.S.B. est obligatoire. En général, la structure de confinement et de protection est mise en œuvre à l'avancement de la pose du G.S.B. Si tel n'est pas le cas, une étude spécifique doit justifier la faisabilité de cette pratique sous les aspects fonctionnels, de mise en œuvre et de durabilité du D.E.G.B. (exemple : prise en compte du gonflement libre, prise en compte de l'état hydrique du G.S.B. pendant les phases transitoires de réalisation, nature du liquide hydratant le G.S.B., etc.). Sur les talus elle sera mise en œuvre du bas vers le haut.

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

#### **3.3.4.2 Solutions courantes**

Bien que chaque cas fasse l'objet d'une étude particulière, il est possible de regrouper les différents types de structures de protection couramment mises en œuvre en deux grandes catégories :

- les structures à base de matériaux naturels cohérents ou non, d'épaisseur constante ou variable ; dans le cas où la couche de confinement n'est pas autostable, il est nécessaire d'assurer sa stabilité par un dispositif de renforcement,
- les structures préfabriquées ou coulées en place : pavés "auto-bloquants", dalles de béton, géoconteneurs.

Sur talus, les structures peuvent être butées en pied ou/et ancrées en tête.

#### **3.3.4.3 Dispositions constructives**

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

##### **■ a) Matériaux naturels sélectionnés**

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.

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 0,50 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 que des manœuvres rectilignes en marche arrière pour accéder à la zone de déchargement et en marche avant pour le retour à vide.

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 G.S.B. 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. Les matériaux sont mis en œuvre par couches de 0,30 m environ. Le boteur, ou le chargeur, doit pousser les matériaux par séquences linéaires. Toutes les manœuvres brutales, ou de nature à altérer les G.S.B., sont prosrites (blocage des chenilles, appui de la lame sur les géosynthétiques, etc.)

Lorsqu'un drainage par canalisations est intégré à la structure de confinement et de protection, la mise en œuvre des matériaux granulaires se fait parallèlement aux drains. L'évolution perpendiculaire aux drains risque de les déplacer ou de les écraser. Si cette disposition ne peut être respectée, il est nécessaire de disposer des cavaliers au dessus des drains.

La structure de confinement et de protection doit être posée sur la structure d'étanchéité (non poussée) sur une épaisseur minimale à définir en fonction de la nature des matériaux et des engins utilisés. Au delà de cette valeur minimale, les matériaux de la structure de confinement et de protection peuvent être poussés.

La détermination de l'épaisseur minimale précitée peut être définie par une expérience similaire formalisée ou par une planche d'essais.

Si le G.S.B. est sensible à une forte amplitude thermique, les phases de mise en

œuvre de la structure de confinement et de protection sont planifiées de manière à éviter le recouvrement des ondulations liées à la dilatation thermique. Celles-ci pourraient, pendant le recouvrement, se transformer en pliures.

### ■ b) Matériaux préfabriqués

Pour minimiser le risque d'endommagement de la structure d'étanchéité, ces matériaux nécessitent en particulier une planéité parfaite du support.

Les joints entre éléments préfabriqués de la structure de confinement et de protection doivent faire l'objet d'un examen afin de s'assurer :

- de la continuité du confinement,
- de la protection du G.S.B. contre les écoulements,
- de la protection du G.S.B. contre les agressions climatiques (U.V., pluie, etc.).

Ces joints peuvent être éventuellement remplis par un matériau de rebouchage.

### 3.3.5 Hydratation des G.S.B.

Après leur mise en œuvre les G.S.B. doivent être hydratés pour assurer la fonction "étanchéité".

On considère qu'une hydratation opérationnelle minimale correspond à une teneur en eau pondérale de la bentonite supérieure ou égale à 100%.

Dans le cas d'une étanchéité simple (voir § 3.2.2) cette hydratation doit concerner l'ensemble de la surface du G.S.B.

L'hydratation peut être effectuée :

- à l'eau douce (arrosage, précipitation, etc.) avant la mise en service de l'ouvrage,
- par transfert d'humidité au contact de la structure support ou de la structure de protection et de confinement.

Lorsque l'ouvrage est susceptible de contenir un effluent chimiquement agressif, l'hydratation du G.S.B. est effectuée à l'eau douce, avant mise en service.

La durée d'hydratation d'un G.S.B. 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 heures par arrosage excédentaire,
- 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 peu hydraté.

Dans le cas d'une étanchéité combinée (voir § 3.2.2) l'hydratation volontaire du G.S.B. n'est pas systématique. Elle est généralement assurée par transfert d'humidité.

### 3.3.6 Dispositions relatives aux arrêts et reprises du chantier

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

- 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 G.S.B. en ne laissant découvertes que les extrémités des lés (sur au moins la largeur du recouvrement),
- protéger les extrémités des lés non recouvertes par la structure de confinement et de protection à l'aide de films plastiques, après avoir éventuellement replié le G.S.B. 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 3.3.3.2,
- s'assurer, à la reprise du chantier, que les parties de G.S.B. en attente ont bien été protégées de l'humidité.

Les parties humidifiées non confinées sont considérées comme des non conformités et doivent donc faire l'objet d'un traitement spécifique.

# 4

## CONTROLES

Les contrôles visés par ce chapitre ont pour but de s'assurer de l'adéquation de la qualité des travaux réalisés et de 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 documentation,
- la réception des différentes phases de travaux intermédiaires ou initiales,
- les produits,
- 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.

Les contrôles s'appliquent :

- à la structure support,
- à la structure d'étanchéité,
- à la structure de confinement et de protection,
- aux ouvrages ou parties d'ouvrages.

Les tableaux ci-après 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.

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 C.C.T.P.

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.

## 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 du fond de forme :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- géométrie : nivellement, planimétrie, topographie, pentes (N)</li> <li>- végétation (N)</li> <li>- accessibilité du chantier (N)</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>caractéristiques des matériaux naturels (A) :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- granulométrie</li> <li>- nature minéralogique</li> <li>- etc.</li> </ul> </li> <li>réception des produits manufacturés (étiquettes) (N)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>densité sèche (A)</li> <li>épaisseur des couches (A)</li> <li>teneur en eau (A)</li> <li>géométrie : nivellement, planimétrie, topographie, pentes (N)</li> <li>points singuliers : drains, puits, collecteurs, regards, etc. (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> <li>- état de surface des tranchées d'ancrage</li> </ul> </li> <li>perméabilité (A)**</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>géométrie : nivellement, planimétrie, 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> </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.

## STRUCTURE D'ETANCHEITE

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 vifs</li> </ul> </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>- conditionnement</li> <li>- stockage</li> </ul> </li> <li>réception des produits (étiquettes) (N)</li> <li>essais d'identification (A)</li> <li>essais de performance (A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>essais de performance (A)</li> <li>essais d'identification (A)</li> <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.)</li> <li>raccordements (ancrages, drains) (N)</li> <li>lestage provisoire (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> </ul> </li> <li>points singuliers, contrôle visuel (A)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- dimensions</li> <li>- emplacement</li> <li>- dispositions constructives</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>contrôle visuel de l'état de surface de la structure d'étanchéité (A)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- déchirure</li> <li>- décollement</li> <li>- propreté</li> <li>- plis</li> </ul> </li> <li>assemblages (A) (dimensions et produits d'apport, joints et points singuliers, propreté)</li> <li>état des raccordements (ancrages, ouvrages) (A)</li> <li>points singuliers, contrôle visuel (A)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- dimensions</li> <li>- emplacement</li> <li>- dispositions constructives</li> </ul> </li> </ul>

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

## 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>contrôle de la réalisation de la 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>nature minéralogique</li> <li>etc.</li> </ul> </li> <li>réception des produits manufacturés (étiquettes) (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, pentes (N)</li> <li>points singuliers, (puisard, etc.), contrôle visuel (A) :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>dispositions constructives</li> </ul> </li> <li>respect de la procédure de mise en œuvre (circulation des engins, sens de mise en œuvre, etc.)</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)</li> <li>portance, déformabilité (A)</li> </ul> </li> <li>épaisseur finale de la structure de confinement (N)</li> </ul>

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

## 4.2 - RECOMMANDATIONS GENERALES RELATIVES AUX CONTROLES D'UN D.E.G.B.

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,
- planche d'essais,
- mise en œuvre et réception de la structure support,
- plan de calepinage des géosynthétiques (ou plan de pose),
- mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques,
- mise en œuvre de la structure de protection et de confinement.

La fréquence des contrôles des différentes structures du D.E.G.B. (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 surfaces de stockage des produits,
- existence des plans de pose et de déploiement des géosynthétiques bentonitiques,
- qualification du personnel en charge de la mise en œuvre du D.E.G.B. et notamment du G.S.B.

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

L'organisation du stockage et de la manutention des géosynthétiques bentonitiques est déterminante 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 qui doivent permettre de respecter les exigences de stockage spécifiées par le fabricant :
  - conditions climatiques (gel, U.V., pluie),
  - conditions physiques (aires planes et propres),
  - conditions de stockage (stockage à plat, empilement),
- la qualité de la préparation et de la manutention des rouleaux :
  - respect des consignes de manutention spécifiées par le fabricant, en particulier éviter la flexion et la torsion des rouleaux,
  - organisation de la manutention lors de la pose des géosynthétiques.

Les opérations de manutention doivent être limitées au strict nécessaire pour éviter la détérioration des structures en place.

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

Les matériels doivent être conformes aux :

- spécifications de manutention,
- spécifications de la planche d'essais (éventuelle),
- spécifications résultantes de l'organisation de la circulation du chantier,
- spécifications de non agression des géosynthétiques et matériaux naturels en place,
- spécifications de pose du fabricant (soudures éventuelles).

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

- étalonnage,
- adaptation à la gamme de mesure.

La fréquence de contrôle de l'étalonnage en cours de chantier est adaptée aux types de mesure et de matériel.

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

- examen visuel du conditionnement,
- examen de la conformité des matériaux naturels et manufacturés aux spécifications (fréquence des contrôles de réception associés aux G.S.B. : voir § 4.3),
- examen de l'étiquetage (produits certifiés, état des contrôles de fabrication en usine),
- échantillonnage pour réalisation d'essais (lors de la mise en œuvre des rouleaux).

Afin d'assurer une traçabilité correcte et conformément aux spécifications du chapitre 5, les étiquettes d'identification des produits doivent être conservées et tenues à disposition du maître d'œuvre.

#### **4.2.4 Planches d'essais**

Les planches d'essais peuvent éventuellement compléter :

- une recherche bibliographique,
- des expériences formalisées dans des conditions similaires de mise en œuvre (matériels, matériaux, produits).

Elles permettent dans certains cas de déterminer ou vérifier :

- les paramètres de mise en œuvre (compactage, principe de pose, phase de travaux, etc.),
- l'adéquation des matériels, matériaux et spécifications si nécessaire.

La planche d'essais 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.

La planche d'essais concerne 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.

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

Compte tenu du coût d'une planche d'essai, il est essentiel que celle ci soit définie

par un programme et que les contrôles réalisés soient enregistrés dans un compte-rendu de la planche d'essais.

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

Cette étape des travaux peut faire l'objet notamment des contrôles suivants :

- épaisseur des couches,
- teneur en eau,
- densité sèche.

Lors de la réception les contrôles complémentaires sont réalisés :

- absence d'ornières (ou limitation de la profondeur et largeur),
- absence de zone de rétention d'eau,
- portance conforme aux exigences spécifiées ou implicites,
- absence d'élément susceptible d'endommager les géosynthétiques,
- respect de la géométrie du projet (nivellement, pentes, topographie, planimétrie).

La réception de la structure support fait l'objet d'un Procès Verbal formalisé (P.V.).

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

L'applicateur doit fournir un plan de pose des géosynthétiques. 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 du plan de phasage des travaux**

Un plan de phasage des travaux doit être établi par l'applicateur ou le maître

d'œuvre. Les contrôles du plan de phasage des travaux portent notamment sur :

- la cohérence des phases de pose des G.S.B. avec la configuration géométrique de l'ouvrage,
- la cohérence du plan de phasage avec le plan de pose et l'organisation prévisionnelle du chantier.

#### **4.2.8 Contrôles associés à la mise en œuvre des géosynthétiques bentonitiques**

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

- les conditions climatiques (vent, pluie, température),
- la réalisation préalable des tranchées d'ancrage,
- la préparation des raccordements aux structures rigides (puisards, drains, ouvrages divers, etc.),
- le respect des phasages de travaux (notamment temps d'exposition aux agents climatiques),
- 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,
  - le respect des exigences de pose et notamment en talus (suivant la ligne de plus grande pente, sens de déploiement),
  - non agression des géosynthétiques par les engins de chantier (roulage, virage, freinage, etc.),
- les échantillonnages pour réalisation d'essais,
- le lestage des géosynthétiques en place,
- le réglage des appareils de soudure (si nécessaire),
- la réalisation des assemblages (largeur, nature et quantité de produits d'apport éventuels, absence de corps étrangers et de plis), ce contrôle est réalisé sur la totalité du linéaire de recouvrement,
- le raccordement aux points singuliers,
- les réparations éventuelles.

#### 4.2.9 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.

Il est nécessaire de contrôler les points suivants :

- granulométrie et nature des matériaux,
- épaisseur des couches,
- 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),
- respect des procédures de déchargement des camions (chute de blocs, virage, freinage, etc.),
- 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.

#### 4.2.10 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 3.3.3.3.

### 4.3 - FREQUENCE DES CONTROLES DE RECEPTION DES CARACTERISTIQUES DES G.S.B.

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

- de la fonction assurée par le G.S.B. dans l'ouvrage,
- de la caractéristique contrôlée,
- de la quantité de G.S.B. mise en œuvre.

Le tableau suivant définit, pour les ouvrages courants, le nombre minimum de contrôles de réception préconisés pour les principales caractéristiques des G.S.B.

Dans le cas d'ouvrage à risque, le maître d'œuvre définit les exigences minimales relatives à la nature et aux fréquences des contrôles de réception des matériaux naturels ou manufacturés.

	FONCTIONS DU G.S.B. DANS L'OUVRAGE			NOMBRE DE CONTROLES PRECONISES (S : Surface de G.S.B. mise en œuvre en m <sup>2</sup> )		
	ETANCHEITE	PROTECTION	REPARATION	S<3000	3000 ≤ S<15000	S ≥ 15000
Caractéristiques à contrôler	- valeur de bleu - absorption d'eau - minéralogie - cisaillement interne - frottements externes	- poinçonnement statique - poinçonnement dynamique		0	0	1
	- perméabilité sous contrainte de confinement - gonflement sous contrainte de confinement - pouvoir de gonflement	- masse surfacique du G.S.B.	- débit de fuite sur perforation amorcée	0	1	S/10000
	- masse de bentonite par unité surfacique du G.S.B.		- masse de bentonite par unité surfacique du G.S.B.	1	2	S/5000

# 5

## ASSURANCE DE LA QUALITE

Les recommandations d'assurance de la qualité du présent fascicule constituent un ensemble de dispositions nécessaires à l'ob-

tention de la qualité finale du dispositif d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques.

Ces dispositions s'inscrivent parmi les exigences des normes ISO 9001, ISO 9002, ISO 9003 et précisent le contenu technique d'un système qualité relatif à la mise en œuvre d'un D.E.G.B.

Les termes d'assurance de la qualité sont définis par la norme ISO 8402.

Le maître d'œuvre fixe contractuellement le référentiel du système qualité applicable aux travaux.

### 5.1 - ORGANISATION DES ACTIONS QUALITE

Généralement, l'organisation des actions qualité au cours du développement d'un projet est précisée par le tableau ci-après.

phases \ intervenants	maître d'ouvrage	maître d'œuvre	entreprises
cahier des charges	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ expression du besoin :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• qualité d'usage (1)</li> <li>• conditions d'exploitation</li> </ul> </li> </ul>		
conception		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ définition de la qualité requise (2)</li> </ul>	
dossier de consultation des entreprises		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ définition du référentiel d'assurance de la qualité</li> <li>■ exigences minimales pour la qualité des moyens et contrôles</li> </ul>	
offres			<ul style="list-style-type: none"> <li>■ réponses aux exigences de l'assurance de la qualité (S.O.P.A.Q.)</li> </ul>
préparation du chantier		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ rédaction du S.D.Q.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ rédaction du P.A.Q.</li> </ul>
travaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ réception</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ vérification de l'application du système qualité (suivis, contrôles extérieurs, récolement, réception, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ application du système qualité (P.A.Q.)</li> </ul>

S.D.Q. : Schéma Directeur de la Qualité : ce document réunit notamment les P.A.Q. des différents intervenants.

S.O.P.A.Q. : Schéma Organisationnel du Plan Assurance Qualité.

P.A.Q. : 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 (ex : respect de la réglementation, spécifications en termes de performances de l'ouvrage et de ses constituants, etc.)

## 5.2 - CONTENU DU PLAN D'ASSURANCE QUALITE (P.A.Q.)

Les Plans d'Assurance Qualité (P.A.Q.) 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.

## 5.3 - CONTENU DU SCHEMA DIRECTEUR DE LA QUALITE (S.D.Q.)

Le schéma directeur de la qualité réunit les P.A.Q. des différents intervenants. Il assure la cohérence entre les différents P.A.Q. 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.

## 5.4 - DOCUMENTS D'ASSURANCE QUALITE

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

documents établis en préalable à la mise en œuvre des produits	documents établis lors de la mise en œuvre des produits	documents établis lors de la réception des ouvrages ou parties d'ouvrages
<ul style="list-style-type: none"> <li>- les P.A.Q.</li> <li>- S.D.Q.</li> <li>- plan de calepinage</li> <li>- P.V. de réception des accès chantier</li> <li>- P.V. de réception des zones d'installation de chantier</li> <li>- P.V. de réception des zones de stockage des produits</li> <li>- P.V. de réception du ou des supports</li> <li>- procédures de stockage, manutention, mise en œuvre, contrôle des produits</li> <li>- P.V. de réception des produits</li> <li>- fiches d'habilitation du personnel</li> <li>- fiches d'identification du matériel de contrôle</li> <li>- P.V. de la ou des planches d'essais</li> <li>- fiches des spécifications techniques des matériaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fiches d'inspection des matériaux</li> <li>- fiches des essais de réglage des matériels (éventuels)</li> <li>- fiches des résultats d'essais</li> <li>- rapports journaliers de contrôles de la qualité</li> <li>- fiches de non conformité</li> <li>- fiches de traitements des non conformités (reportées sur le plan de récolement)</li> <li>- rapport final d'inspection</li> <li>- rapport final des contrôles qualité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- P.V. de réception de l'ouvrage ou d'une partie d'ouvrage</li> <li>- P.V. d'épreuve de l'ouvrage ou d'une partie d'ouvrage</li> <li>- procédure d'exploitation et d'entretien de l'ouvrage (si contractuelle)</li> </ul>

 ANNEXES

## ANNEXE A : ABREVIATIONS

<b>A.S.T.M.</b>	American Society for Testing and Materials
<b>C.C.T.P.</b>	Cahier des Clauses Techniques Particulières
<b>C.S.D.</b>	Centre de Stockage de Déchets
<b>C.F.G.</b>	Comité Français des Géosynthétiques
<b>D.E.G.B.</b>	Dispositif d'Etanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques
<b>D.I.N.</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>E.N.</b>	European Norm
<b>G.S.B.</b>	Géosynthétiques Bentonitiques
<b>Gmb</b>	Géomembranes
<b>Gtx</b>	Géotextiles
<b>I.S.O.</b>	International Standard Organisation
<b>N.F.</b>	Norme Française
<b>P.A.Q.</b>	Plan d'Assurance Qualité
<b>P.E.H.D.</b>	Polyéthylène Haute Densité
<b>P.V.</b>	Procès-Verbal
<b>P.V.C.</b>	Polychlorure de Vinyle
<b>S.D.Q.</b>	Schéma Directeur de la Qualité
<b>S.O.P.A.Q.</b>	Schéma Organisationnel du Plan d'Assurance Qualité
<b>U.V.</b>	Ultra-Violets (rayons)

## 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, aluminosilicate 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.

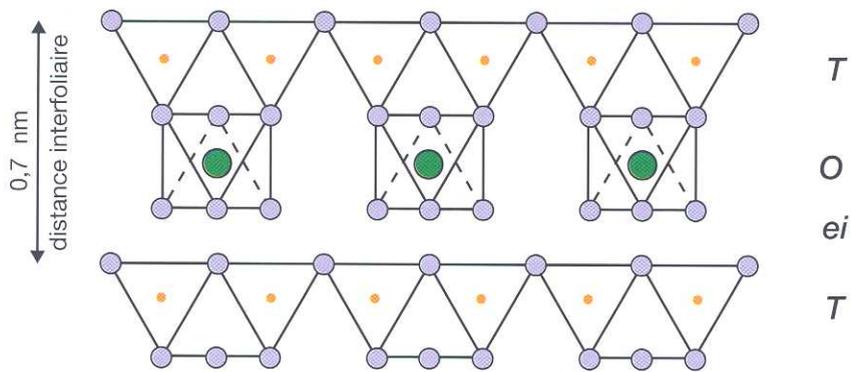
La capacité d'échange d'une argile dépend de sa constitution chimique ou de sa granulométrie. Dans leur structure, pour compenser la charge d'un cation, plusieurs atomes d'une surface peuvent intervenir et ainsi former des demi et des tiers de liaisons covalentes. La charge des cations est très concentrée 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 :

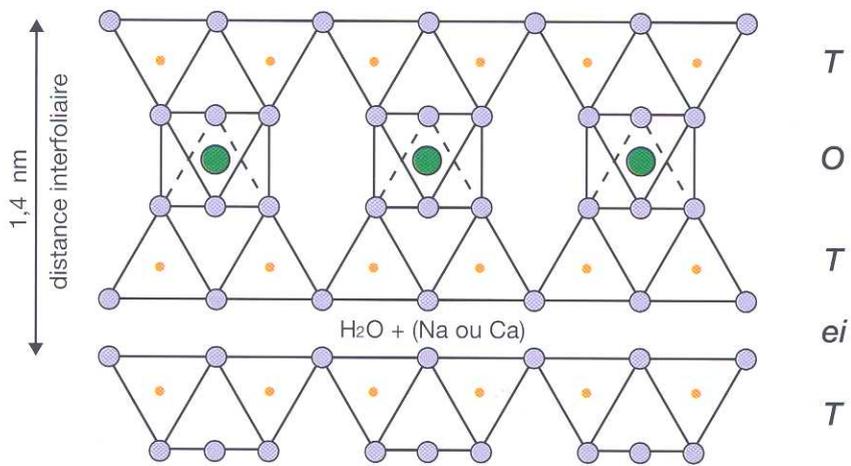
- les liaisons non satisfaites dues aux charges négatives situées sur les bords des cristaux tétraédriques ou octaédriques,
- le déséquilibre des charges dans les structures élémentaires résultant des

substitutions de l'aluminium  $Al^{3+}$  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.



**A** Kaolinite



○ Oxygène    ● Aluminium    ● Silicium

**B** Montmorillonite

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, 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, 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.

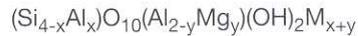
Mais pour que ces caractéristiques soient conservées, il faut s'assurer de l'effet de solutions complexes sur ces structures. Bien que de nombreuses propriétés soient connues, le comportement de tels matériaux en contact avec des lixiviats et cela pendant une grande période est encore mal connu.

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, 1992 ; Tessier *et al.*, 1992).

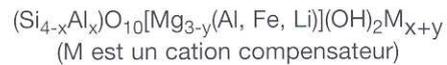
### III.1. Les feuillets

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 :



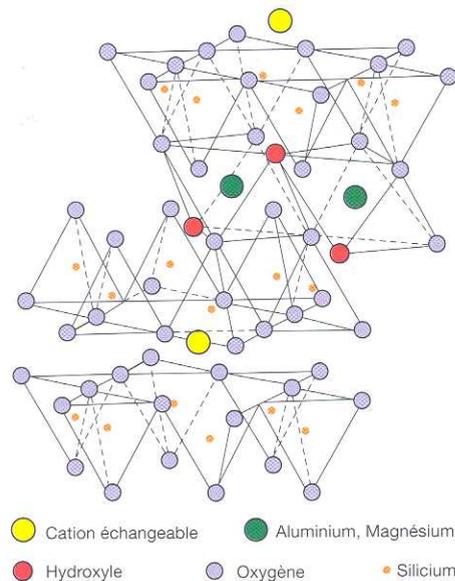
- une série trioctaédrique :



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  $\mu m$ .

### III.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).

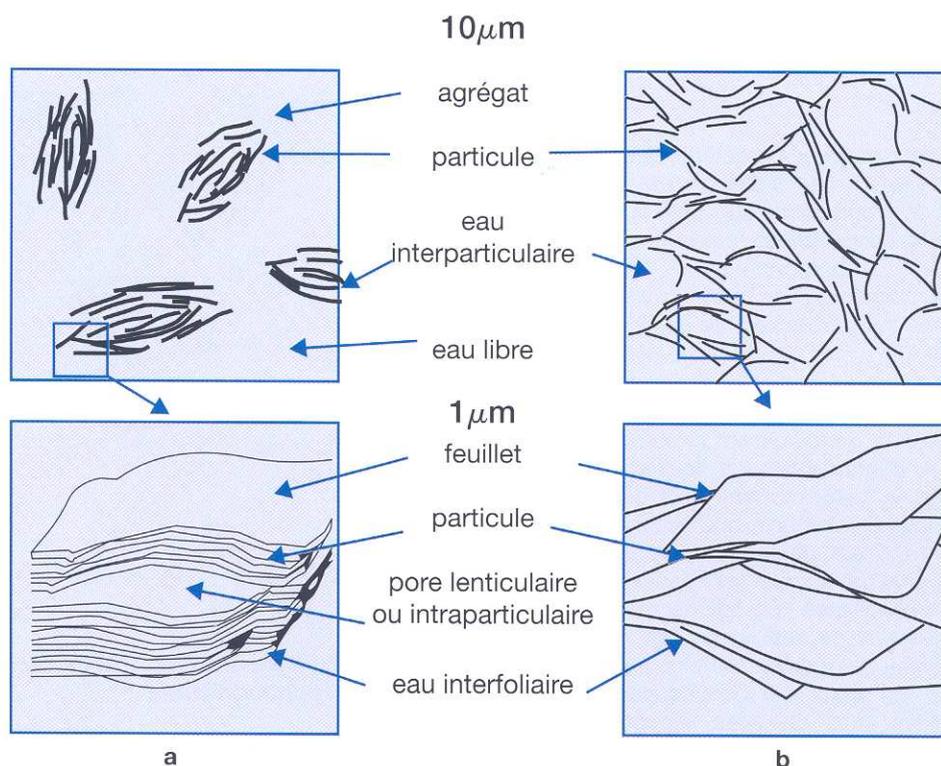


Figure 3 : Arrangement des feuillets de montmorillonite : a) en agrégats ; b) en gel (Jin, 1994)

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 comporte-

ment 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

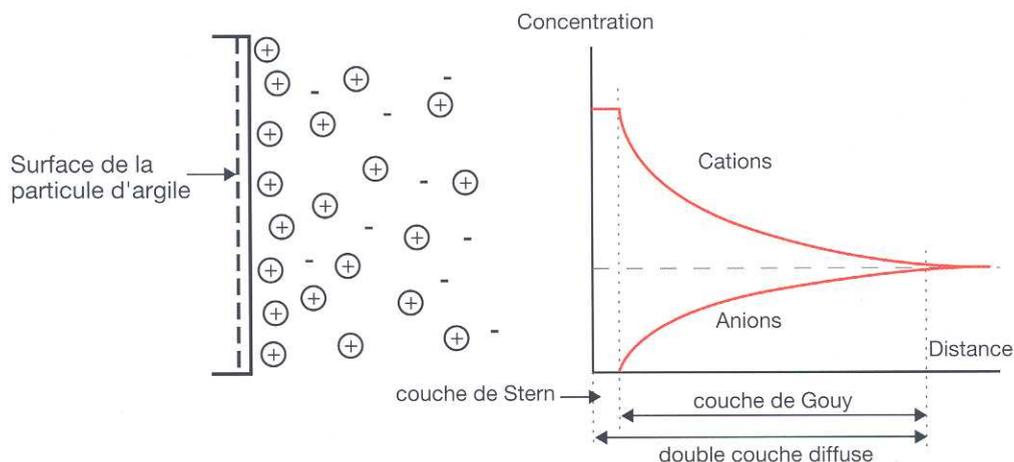


Figure 4 : Distribution des ions adjacents à la surface en concordance avec la théorie de la double couche diffuse

concentration et de la constante diélectrique de la solution.

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'ultrafiltration et la mesure des pressions de gonflement) ou 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 :

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

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.

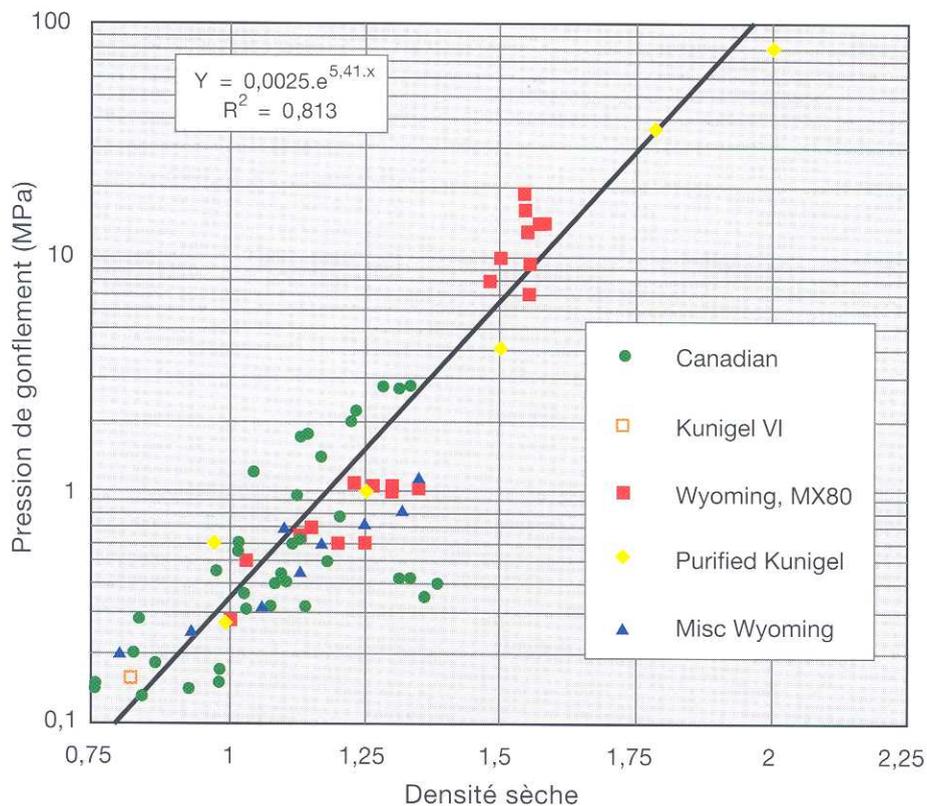


Figure 5 : Pression de gonflement en fonction de la densité sèche

L'évolution du gonflement  $\Delta h$ , et de la pression de gonflement  $\sigma_G$ , en fonction du temps suivent une loi hyperbolique pour des 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,
- $t$  le temps,
- $\Delta h_{\infty}$  le gonflement pour un temps infini,
- $t_{50}$  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,
- $t$  le temps,
- $\sigma_{G\infty}$  la pression de gonflement pour un temps infini,
- $t'_{50}$  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

inexistants et la structure est désordonnée (Bérend, 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 du 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.

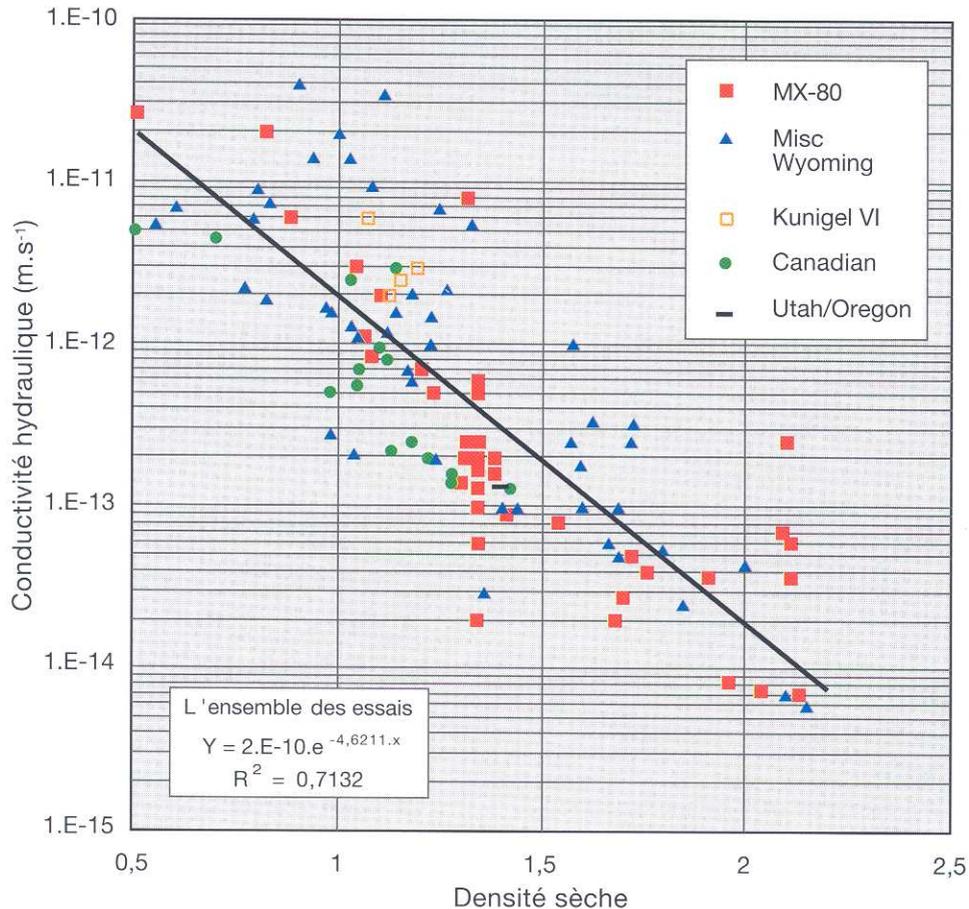
#### ● L'activité de l'eau

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).



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

Ces données montrent que la perméabilité des bentonites varie entre  $10^{-11}$   $m.s^{-1}$  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 G.S.B. variant entre 0,8 et 1, la fourchette de la perméabilité attendue se situe, à titre indicatif, entre  $1 \times 10^{-11}$  et  $1 \times 10^{-12}$   $m.s^{-1}$ .

La nature du fluide en contact avec la bentonite joue un rôle primordial sur 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 ou les bases pures,
- 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. Les G.S.B. préhydratés à l'eau ont des perméabilités aux lixiviats presque identiques aux perméabilités à l'eau, tandis que les G.S.B. hydratés directement avec le même lixiviat ont des perméabilités supérieures de 4 ordres de grandeurs. Ils ont trouvé que les lixiviats les plus agressifs sont ceux qui ne contiennent pas de particules solides en suspension ou de micro-organismes et qui présentent des concentrations importantes en ions  $\text{Ca}^{2+}$ .

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

## BIBLIOGRAPHIE

- CHAMAYOU, LEGROS, 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, pp. 251-264.
- DIXON, D.A., GRAY, M.N., 1996. *Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and the USA*. Environmental Geotechnics, Kamon ed., Balkema.
- EGLOFFSTEIN, T., 1995. *Properties and test methods to assess bentonite used in Geosynthetic Clay Liners*. Geosynthetic Clay Liners, Proceedings of the International Symposium Nürnberg, 14-15 April 1994, Balkema.
- GOLDMAN, L.J., GREENFIELD, L.I. et al., 1990. *Clay liners for waste management facilities. Design, construction and evaluation*. Pollution Technology review n°. 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, April 1997, vol. 123, N°.4
- 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 Dr. d'Etat Univ. Paris VII, INRA Versailles publications.
- TESSIER, D., 1992. *Propriétés des argiles : hydratation, gonflement en relation avec leur texture. Importance pour les sols*. GRECO géomatériaux, les argiles : microstructures 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 N°1, pp. 151-161
- VAN OLPHEN, H., 1977. *An introduction to Clay Colloid Chemistry*, 2nd ED. J. Wiley and Sons Editor.

# ANNEXE C : LISTE DES NORMES ET ESSAIS RELATIFS AUX G.S.B.

(DIRECTEMENT APPLICABLES AUX G.S.B. OU NECESSITANT UNE ADAPTATION POUR L'ÊTRE)

Caractéristiques	Élément concerné	Contenu	Références des normes couvrant les G.S.B. ou leurs composants	Références des normes ne couvrant pas les G.S.B.	Commentaires
absorption d'eau	Bentonite	capacité de la bentonite à absorber l'eau	ASTM-E-946-83		- applicable à la bentonite
absorption d'eau	Bentonite	capacité de la bentonite à absorber l'eau	DIN 18 132		- applicable à la bentonite
autocicatrisation	G.S.B.	méthode d'essai permettant de caractériser l'aptitude d'un G.S.B. à limiter les fuites au droit d'une blessure traversante (avec et sans enlèvement de l'objet traversant)			- essais non normalisés
cisaillement interne	G.S.B.	mesure de la résistance au cisaillement interne du G.S.B.			- essai non normalisé
conteneurisation	G.S.B.	mesure de la capacité du G.S.B. à contenir la bentonite ; à sec, sous gradient hydraulique ou sous sollicitations mécaniques ; dans le plan du G.S.B. et perpendiculairement au plan du G.S.B.			- essai non normalisé
débit de fuite sur perforation amorcée	D.E.G. et D.E.G.B.	méthode d'essai pour mesurer le débit de fuite au droit d'une perforation ou d'un défaut d'un D.E.G. utilisant un G.S.B. en étanchéité combinée sous contrainte spécifiée			- essai non normalisé
dommage lors de la mise en œuvre	G.S.B.	méthode pour simuler en laboratoire les effets de la mise en œuvre du D.E.G.B. Les échantillons sollicités sont testés par des essais d'identification			- essais non normalisés - le dommage subi lors de la mise en œuvre peut être évalué lors d'une planche d'essais - le dommage subi lors de la mise en œuvre peut être appréhendé par les caractéristiques, conteneurisation, poinçonnement dynamique et statique du D.E.G.B., etc.
échantillonnage	G.S.B.	échantillonnage et préparation des éprouvettes		ISO 9862	- applicable aux géotextiles
échantillonnage	G.S.B.	échantillonnage et préparation des éprouvettes		NF EN 963 (G 38 106)	- applicable aux géotextiles et produits apparentés - norme établie à partir de l'ISO 9862
échantillonnage	G.S.B.	échantillonnage et préparation des éprouvettes		NF P 84 504	- applicable aux géomembranes
éclatométrie	G.S.B.	mesure de la résistance du G.S.B. (résistance déformation, module d'élasticité, etc.) sous une sollicitation biaxiale		NF P 84 503	- applicable aux géomembranes - norme en cours d'homologation
épaisseur	G.S.B.	détermination de l'épaisseur à des pressions prescrites		ISO 9863	- applicable aux géotextiles
épaisseur	G.S.B.	détermination de l'épaisseur à des pressions prescrites - partie 2 : méthode de la détermination de l'épaisseur des couches individuelles de produits multicouches		ISO 9863-2	- applicable aux géotextiles et produits apparentés

Caractéristiques	Élément concerné	Contenu	Références des normes couvrant les G.S.B. ou leurs composants	Références des normes ne couvrant pas les G.S.B.	Commentaires
épaisseur	Gtx	détermination de l'épaisseur des géotextiles constitutifs d'un G.S.B. à des pressions prescrites (individuelle 964-1)		NF EN 964-1 (NF G 38 107-1)	- applicable aux géotextiles et apparentés
épaisseur	Géofilm/ Gmb	méthode pour déterminer l'épaisseur d'un géofilm ou d'une géomembrane sous des pressions spécifiées dont la pression nominale		XP P 84 512-1	- applicable aux géomembranes et apparentés
épaisseur du G.S.B.	G.S.B.	détermination de l'épaisseur d'un G.S.B. à des pressions prescrites (des produits monocouches et multicouches 964-2)		NF EN 964-2 (NF G 38 107-2)	- applicable aux géotextiles et apparentés
frottements	G.S.B. / D.E.G.B.	méthode pour déterminer les propriétés de frottement des G.S.B. au moyen d'essais de cisaillement direct et de plan incliné. L'essai couvre toutes les combinaisons d'interfaces du G.S.B. avec les matériaux synthétiques ou naturels		pr EN ISO 12957-1	- applicable aux géotextiles
frottements	G.S.B.	mesure de l'angle de frottement "géomembrane - sable normal" à la boîte de cisaillement		NF P 84 505	- applicable aux géomembranes
frottements	D.E.G.B.	mesure de la résistance au glissement des dispositifs d'étanchéité par géomembrane (D.E.G.) à l'aide d'un plan incliné		NF P 84 522	- applicable aux géomembranes
gonflement sous contrainte de confinement	G.S.B.	méthode pour déterminer les propriétés de gonflement à l'eau et aux lixiviats et les propriétés d'absorption/désorption du G.S.B. selon la teneur en eau		XP P 94 091	- essai à l'oedomètre sur éprouvette de G.S.B.
granulométrie à sec (bentonite sous forme de granulés)	Bentonite	granulométrie par tamisage au moyen de tamis à mailles carrées	NF P 94 056		- s'applique aux sols au sens géotechnique du terme (bentonite sous forme de granulés) - elle s'applique à la partie granulaire > 80 µm
identification	G.S.B.	identification sur site		ISO 10 320 (G 38 105) NF P 84 520	- applicable aux géotextiles et produits apparentés - applicable aux géomembranes
identification	G.S.B.	identification sur site			
masse de bentonite par unité de surface de G.S.B.	G.S.B.	méthode pour déterminer la masse de bentonite par unité de surface d'un G.S.B.	ASTM D 5993		
masse surfacique du G.S.B.	G.S.B.	méthode pour déterminer la masse surfacique d'un G.S.B.		NF EN 965 (NF G 38 108)	- applicable aux géotextiles et apparentés
masse surfacique du G.S.B.	G.S.B.	méthode pour déterminer la masse surfacique d'un G.S.B.		NF P 84 514	- applicable aux géomembranes
masse surfacique du G.S.B.	G.S.B.	méthode pour déterminer la masse surfacique d'un G.S.B.	ASTM D 5993		
minéralogie	Bentonite	définition relative des constituants minéraux (smectites, etc.) et du type (Ca, Na, etc.)			cette caractéristique relève de la normalisation existante dans le domaine de la minéralogie

Caractéristiques	Élément concerné	Contenu	Références des normes couvrant les G.S.B. ou leurs composants	Références des normes ne couvrant pas les G.S.B.	Commentaires
ouverture de filtration	Gtx	méthode pour déterminer la porométrie caractéristique d'un Gtx et apparenté, et le diamètre caractéristique de la particule la plus grossière capable de passer au travers de l'échantillon		Pr NF EN ISO 12 956 (Pr G 38 141)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- norme en projet applicable aux Gtx et produits apparentés</li> </ul>
ouverture de filtration	Gtx	méthode pour déterminer la porométrie caractéristique d'un Gtx et apparenté, et le diamètre caractéristique de la particule la plus grossière capable de passer au travers de l'échantillon		NF G 38 017	<ul style="list-style-type: none"> <li>- applicable aux Gtx et produits apparentés</li> </ul>
pelage	G.S.B.	mesure de la résistance au pelage des géosynthétiques constitutifs du G.S.B.		NF P 84 502-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- applicable aux joints des géomembranes</li> <li>- la taille de l'éprouvette doit être adaptée</li> <li>- bien que les joints des G.S.B. ne soient pas soudés cet essai peut s'appliquer à la mesure de la résistance au pelage des géosynthétiques constitutifs du G.S.B.</li> </ul>
perçement par granulats sur support rigide	D.E.G.B. / G.S.B.	méthode pour déterminer la résistance à la perforation du G.S.B. et du D.E.G.B. sous l'action d'un poinçonnement statique par granulats		NF P 84 510	<ul style="list-style-type: none"> <li>- applicable aux géomembranes et apparentés</li> <li>- norme à adapter pour qualifier l'endommagement</li> </ul>
perforation dynamique	G.S.B.	méthode pour déterminer la résistance à la perforation du G.S.B. sous conditions de charges dynamiques (chute de cône)		NF EN 918 (NF G 38 121)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- applicable aux géotextiles et apparentés</li> </ul>
perméabilité des joints	G.S.B.	mesure du flux d'eau au droit de la perméabilité des joints des G.S.B. sous contrainte et gradient hydraulique fixés			<ul style="list-style-type: none"> <li>- essai non normalisé</li> </ul>
perméabilité du G.S.B. aux gaz	G.S.B.	mesure du flux de gaz traversant le G.S.B. sous contrainte et à teneur en eau fixées			<ul style="list-style-type: none"> <li>- essai non normalisé,</li> <li>- texte en cours d'examen au niveau européen</li> </ul>
perméabilité du G.S.B. sous contrainte .	G.S.B.	mesure du flux d'eau traversant le G.S.B. sous contrainte et gradient hydraulique fixés	ASTM D 5887		<ul style="list-style-type: none"> <li>- essai à l'appareil triaxial</li> </ul>
poinçonnement à long terme du D.E.G.B.	D.E.G.B.				<p>cet essai vise le poinçonnement lorsque la charge maximale sur le D.E.G.B. est prévue à long terme (exploitation de l'ouvrage). voir poinçonnement statique</p>
poinçonnement à long terme du G.S.B.	G.S.B.				<p>cet essai vise le poinçonnement lorsque la charge maximale sur le G.S.B. est prévue à long terme (exploitation de l'ouvrage; voir poinçonnement statique)</p>

Caractéristiques	Élément concerné	Contenu	Références des normes couvrant les G.S.B. ou leurs composants	Références des normes ne couvrant pas les G.S.B.	Commentaires
poinçonnement dynamique du D.E.G.B.	G.S.B. et géosynthétiques associés	méthode pour déterminer la résistance au poinçonnement du D.E.G.B. sous conditions de charges dynamiques		NF P 84 506	<ul style="list-style-type: none"> <li>- norme applicable aux géomembranes et apparentées</li> <li>- cette caractéristique peut être vérifiée par une planche d'essais norme à adapter pour les D.E.G.B. (hors couche de confinement)</li> </ul>
poinçonnement statique du D.E.G.B.	G.S.B. et géosynthétiques associés	méthode pour déterminer la résistance au poinçonnement du D.E.G.B. sous conditions de charges statiques		NF P 84 507	<ul style="list-style-type: none"> <li>- norme applicable aux géomembranes et apparentés</li> <li>- essai réalisé sur le D.E.G.B. lorsque des géosynthétiques sont prévus en protection du G.S.B.</li> </ul>
poinçonnement statique du G.S.B.	G.S.B.	essai de poinçonnement statique (essai C.B.R.)		NF EN ISO 12236 (G 38 120)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- applicable aux géotextiles et produits apparentés</li> </ul>
poinçonnement statique du G.S.B.	Géofilm	essai de poinçonnement statique		NF P 84 507	<ul style="list-style-type: none"> <li>- applicable aux géomembranes et dispositifs d'étanchéité par géomembrane</li> </ul>
pouvoir de gonflement	Bentonite	méthode pour la détermination de l'indice de gonflement libre de la bentonite	ASTM-D-5890		
résistance à la dégradation chimique					un projet de norme applicable aux géotextiles et produits apparentés est en cours de rédaction au niveau européen (ISO WD 12 960)
résistance à la dégradation microbiologique	Gtx			XP ENV 12 225	<ul style="list-style-type: none"> <li>- un projet de norme applicable aux géotextiles et produits apparentés est en cours de rédaction au niveau européen (Pr ENV 12 225) applicable aux géotextiles</li> </ul>
résistance aux U.V.	Gtx / Géofilm			XP ENV 12 224	<ul style="list-style-type: none"> <li>- norme applicable aux géotextiles et aux géofilms</li> <li>- caractérisation de la résistance aux U.V. à court terme</li> </ul>
retrait	G.S.B.	méthode d'essai permettant de caractériser le retrait du G.S.B. en fonction de la variation de la teneur en eau de la bentonite ou de la variation thermique			<ul style="list-style-type: none"> <li>- essai non normalisé</li> </ul>

Caractéristiques	Élément concerné	Contenu	Références des normes couvrant les G.S.B. ou leurs composants	Références des normes ne couvrant pas les G.S.B.	Commentaires
souplesse	G.S.B.	méthode d'essai pour la détermination des caractéristiques en souplesse - approche tridimensionnelle		NF G 38 021-2	- applicable aux géotextiles et produits apparentés
souplesse	G.S.B.	méthode d'essai pour la détermination des caractéristiques en souplesse - approche tridimensionnelle		NF P 84 511-2	- applicable aux géomembranes
stabilité du D.E.G.B. sur pente	D.E.G.B.	cette caractéristique résulte de l'étude géotechnique du projet. Elle s'appuie notamment sur les caractéristiques de frottements au droit des interfaces et de cisaillements internes des G.S.B.			
teneur en eau	Bentonite		NF P 94 050		- applicable à la bentonite
traction	G.S.B.	méthode d'essai pour déterminer les propriétés en traction (résistance, déformation à la rupture, modules sécants) de Gtx et apparentés, en utilisant une bande large (50 cm) et étroite (20 cm)		NF EN ISO 10 319 (G 38 129)	- applicable aux géotextiles et apparentés
traction	G.S.B.	méthode d'essai pour déterminer les propriétés en traction (résistance, déformation à la rupture, modules sécants)		NF P 84 501	- applicable aux géomembranes
traction sur joints	G.S.B.	méthode d'essai pour déterminer les propriétés en traction ; essais sur joints		NF EN ISO 10 321 (G 38 116)	- applicable aux géotextiles et apparentés
traction sur joints	G.S.B.	méthode d'essai pour déterminer les propriétés en traction (résistance, déformation à la rupture, modules sécants) ; essais sur joints		NF P 84 502-1	- applicable aux géomembranes
valeur de bleu	Bentonite	valeur de bleu de méthylène		NF P 94 068	- applicable aux sols fins - l'essai doit être modifié notamment pour adapter la prise d'échantillon au matériau testé
vieillessement	Bentonite	détermination de l'évolution à moyen terme et à long terme de la minéralogie de la bentonite dans un environnement donné			cette caractéristique s'appuie sur la connaissance de la minéralogie de la bentonite et de l'environnement lié à un projet



Recouvrement des lés avec apport de bentonite



Traitement d'un point singulier par apport de bentonite en pâte



Étanchéité combinée



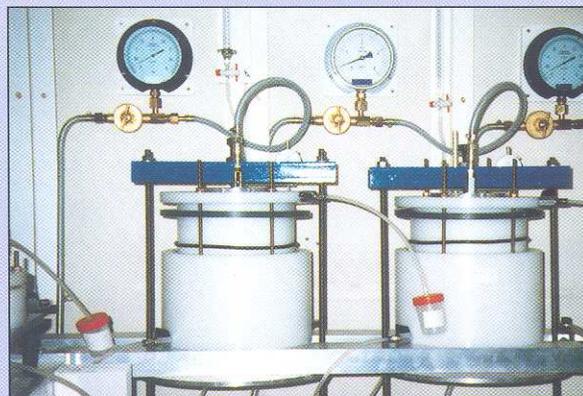
Traitement de l'étanchéité d'un accotement routier



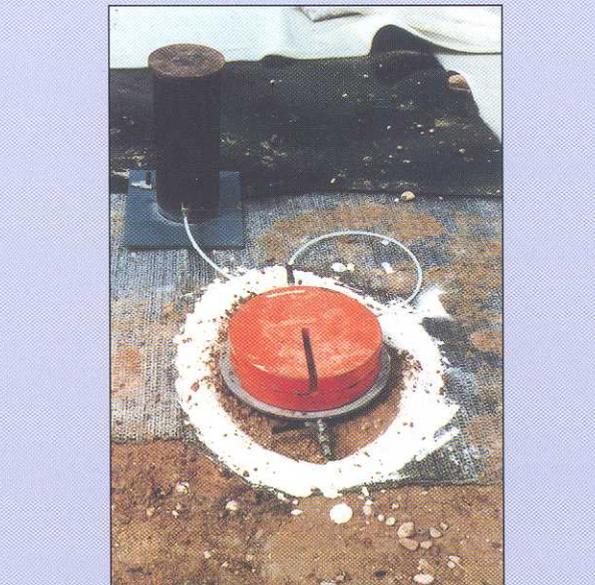
Centre de stockage de déchets - étanchéité combinée



Bassin



Essai de perméabilité en laboratoire à l'oedoperméamètre



Essai de perméabilité in situ au pressio-infiltromètre

