

TECHNIQUE

Définition, mise en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques

*Cahier élaboré par
le Comité français des géosynthétiques (CFG)*

Cahier détaché N°1

Sommaire

1. PRÉSENTATION DES GÉOSYNTHÉTIQUES	4
1.1. Que sont les géosynthétiques ?	4
1.2. Principaux termes utilisés.....	4
1.3. Fonctions des géosynthétiques	6
1.4. Durée de vie	8
2. OUVRAGES HYDRAULIQUES	9
2.1. Historique.....	10
2.2. Conception des DEG	10
2.3. Géotextiles filtrants	11
2.4. Tubes géosynthétiques	11
3. ROUTES ET INFRASTRUCTURES LINÉAIRES	13
3.1. Généralités.....	13
3.2. Terrassements routiers et ferroviaires	13
3.3. Anti-fissuration de chaussées	14
3.4. Base de remblais	14
3.5. Filtres drains.....	18
3.6. Drainage en masque drainant.....	19
3.7. Murs et talus renforcés.....	19
4. BÂTIMENT	21
4.1. Drainage horizontal sous dalle béton	21
4.2. Drainage et étanchéité ou imperméabilisation des parois enterrées.....	22
4.3. Confinement des gaz sur sites pollués	23
4.4. Protection contre les aléas de retrait – Gonflement des argiles	24
4.5. Drainage en toitures-terrasses et parvis	25
5. OUVRAGES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT	26
5.1. Installations de stockage de déchets	26
5.2. Dépollution des sites et sols pollués (SSP)	29
6. DIMENSIONNEMENT ET PRESCRIPTIONS	31
6.1. Principe du dimensionnement par fonction et spécifications	31
6.2. Séparation	32
6.3. Filtration	32
6.4. Drainage.....	33
6.5. Renforcement.....	33
6.6. Critères de dimensionnement.....	34
6.7. Protection des géomembranes	37
7. DÉMARCHE DE CERTIFICATION	37
POUR EN SAVOIR PLUS	38
Références bibliographiques	38

Définition, mise en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques

Depuis leur apparition dans les années 1960, les géosynthétiques (géotextiles, géomembranes et produits apparentés) sont devenus des matériaux majeurs dans tous les domaines du génie civil. Les premiers géotextiles et les premières géomembranes ont été perfectionnés pour étendre leurs applications. Des essais et des normes ont été établis, avec des systèmes de contrôle de la qualité.

Le Comité français des géosynthétiques (CFG) regroupe tous les acteurs français de la fabrication, de la caractérisation, de la pose et, plus largement, de l'ingénierie de ces produits. Il présente aux lecteurs de ce cahier détaché, publié et diffusé par « Le Moniteur », un panorama des produits et de leurs applications dans les domaines des ouvrages hydrauliques, des infrastructures linéaires de transport, du bâtiment et de la protection de l'environnement.

Des informations complémentaires sont accessibles sur le site du CFG : www.cfg.asso.fr.

Je remercie, au nom du CFG, les auteurs de ce document : Nathalie Touze-Foltz, Florent Roussy, Thierry Gisbert et Pierre Gendrin, ainsi que Jean-Pierre Gourc qui en a assuré la relecture.

Jean-Pierre Magnan

Président du Comité français de géosynthétiques (CFG).



1. PRÉSENTATION DES GÉOSYNTHÉTIQUES

1.1. Que sont les géosynthétiques ?

Un géosynthétique est un produit dont au moins un des constituants est à base de polymère synthétique (polyéthylène, polyamide, polyester ou polypropylène, par exemple) ou naturel. Il se présente sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle. Il est utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Un certain nombre de géosynthétiques sont définis par la norme de terminologie NF EN ISO 10318 [1]. Certains termes qui ne sont pas définis dans cette norme peuvent être trouvés dans la terminologie établie par l'*International Geosynthetics Society* (IGS).

Les ouvrages dans lesquels les géosynthétiques sont utilisés sont multiples : infrastructures linéaires de transport (routes, voies ferrées), ouvrages hydrauliques (barrages, bassins, canaux), ouvrages pour la protection de l'environnement (installations de stockage de déchets, stockage de déchets miniers, sites et sols pollués), bâtiments. Ces différentes applications seront illustrées dans la suite de ce document. Pour le cas particulier des tunnels, le fascicule 67 Titre III du cahier des clauses techniques générales (CCTG) régit l'utilisation des géosynthétiques [2]. Il n'est pas repris ici.

Les géosynthétiques sont généralement répartis en deux grandes familles :

- les géotextiles et produits apparentés aux géotextiles qui sont des produits perméables ;
- les géomembranes et les géosynthétiques bentonitiques qui sont essentiellement imperméables.

Les géosynthétiques sont définis par des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques selon des essais normalisés, identifiés pour l'essentiel par des normes internationales de type ISO, européennes de type EN, ou nationales de type NF, DIN, ASTM...

1.2. Principaux termes utilisés

L'objectif de ce paragraphe est de définir les principaux termes relatifs aux matériaux géosynthétiques utilisés dans la suite du document.

Un **géotextile** est défini par la norme NF EN ISO 10318 comme une matière textile plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), pouvant être non tissée, tricotée ou tissée, utilisée en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans le domaine de la géotechnique et du génie civil (Fig. 1).

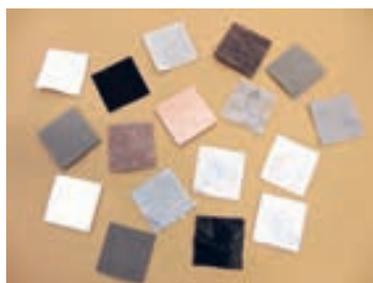


Figure 1. Échantillons de géotextiles (© Irstea).

Une **géomembrane** est définie par la norme NF P84-500 [3] comme un produit manufacturé adapté au génie civil, se présentant sous la forme de lés, d'une largeur minimale de 1,50 m. Mince, souple, continue et étanche aux fluides à la sortie de la chaîne de fabrication, elle présente une épaisseur effective de 1 mm minimum sur toute la surface du lé. Elle est soudable en continu, quelles que soient les faces des lés en contact, par soudure thermique, par vulcanisation ou par bandes adhésives autocollantes selon la nature du produit. Elle correspond aux définitions des barrières géosynthétiques polymériques ou bitumineuses données dans la norme NF EN ISO 10318. Le terme « géomembrane » est préféré en France (Fig. 2).

Les matériaux d'épaisseur inférieure au millimètre sont appelés « géofilms ».

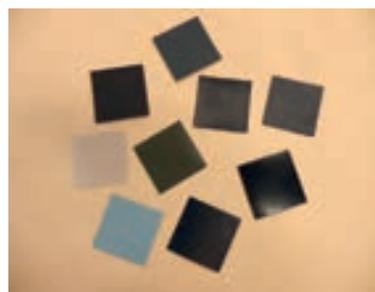


Figure 2. Échantillons de géomembranes (© Irstea).

Un **géosynthétique bentonitique** (GSB) est défini par la norme XP P84-700 [4] comme un produit manufacturé en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comportant au moins de la bentonite, en poudre ou en granulés, celle-ci assurant la fonction étanchéité, et d'un ou plusieurs géosynthétiques utilisés comme supports ou conteneurs. Il est utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. Cette définition correspond à celle des barrières géosynthétiques argileuses donnée dans la norme NF EN ISO 10318. Le terme « géosynthétique bentonitique » est préféré en France (Fig. 3).



Figure 3. Exemple de géosynthétique bentonitique (© Irstea).

Une **géobande** est définie comme un matériau à base de polymère, qui se présente sous la forme de bandes dont la largeur n'exécède pas 200 mm. Elle est utilisée en contact avec le sol et/ou d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Un **géoconteneur** est défini comme un conteneur en géosynthétique rempli de sol ou d'un autre matériau.

Un **géospaceur** est défini comme une structure tridimensionnelle à base de polymère, conçue pour créer un espace dans le sol

et/ou dans d'autres matériaux. Il est utilisé dans les domaines de la géotechnique et du génie civil (Fig. 4). L'objectif de cet espace est de favoriser la circulation des fluides (liquides et gaz).



Figure 4. Exemple de géoespaceur (© Ryb Composites).

Une **géogrille** est définie comme une structure plane à base de polymère constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement. Les ouvertures des géogrilles ont des dimensions supérieures à celles des constituants (Fig. 5).

Un **géocomposite** est un produit issu de la combinaison industrielle de deux ou plusieurs géosynthétiques (Fig. 6).

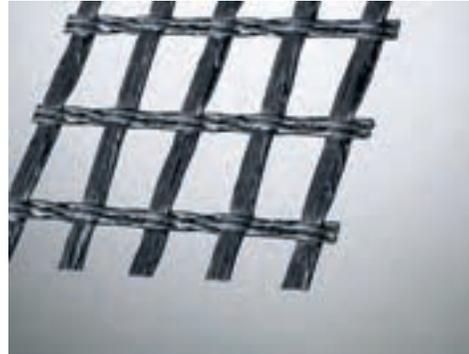


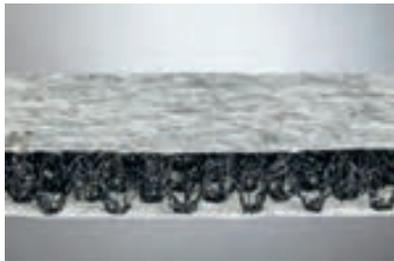
Figure 5. Exemple de géogrille (© Bonar).



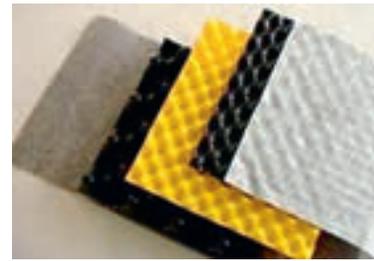
© Bonar



© Bonar



© Bonar



© Ryb Composites



© Afitex



© Afitex

Figure 6. Quelques exemples de géocomposites.

1.3. Fonctions des géosynthétiques

1.3.1. Fonctions des géotextiles et produits apparentés

Les géotextiles et produits apparentés peuvent remplir, dans les domaines de la géotechnique et du génie civil où ils sont utilisés, différentes fonctions (Fig. 7) :

- **la séparation** : prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblais adjacents de natures différentes ;
- **la filtration** : rétention du sol, ou d'autres particules soumises à des forces hydrodynamiques, tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile, ou un produit apparenté aux géotextiles. Le géotextile permet de créer un auto-filtre dans le sol en amont ;
- **le drainage** : collecte et transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles ;
- **le renforcement** : utilisation du comportement en traction-déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté, afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction ;

- **la protection** : prévention ou limitation des endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné, en utilisant un géotextile ou un produit apparenté ;

- **la lutte contre l'érosion de surface** : utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface.

Remarque

- Il ne faut pas confondre les méthodes et procédés de lutte contre l'érosion avec les procédés de stabilisation de couche de sol mince sur une pente au-dessus des dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques par exemple. Ce sujet fait l'objet d'une norme expérimentale : la norme XP G38-067 [5].

Les géotextiles peuvent également être utilisés pour retarder les remontées de fissures en surface des structures de chaussée. Cette utilisation n'est pas définie comme une fonction officielle par la norme NF EN ISO 10318.

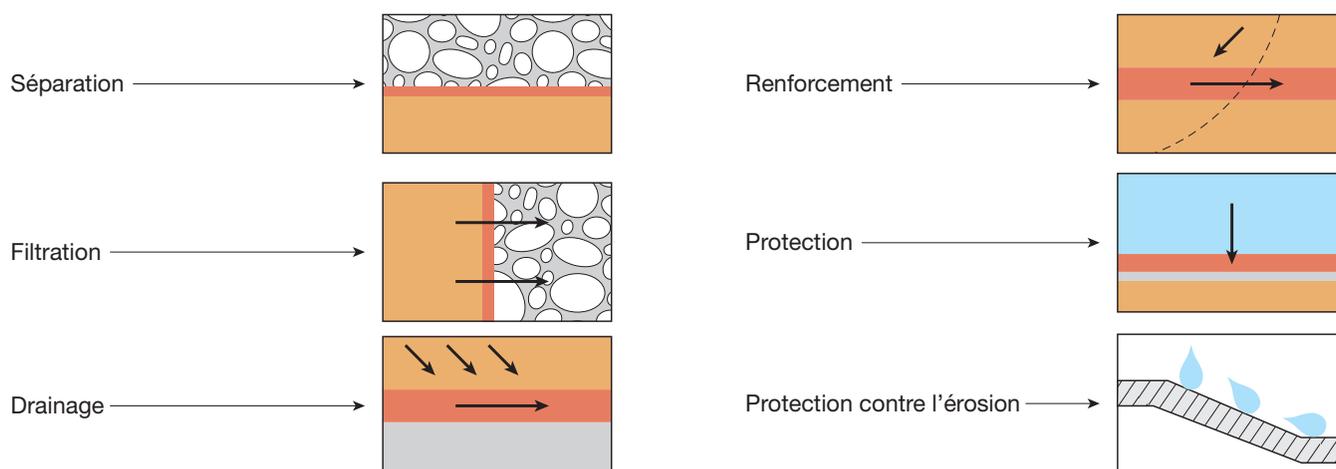


Figure 7. Principales fonctions des géotextiles et produits apparentés d'après la norme NF EN ISO 10318.

1.3.2. Fonction des géomembranes et des géosynthétiques bentonitiques

L'unique fonction des géomembranes et des géosynthétiques bentonitiques est d'assurer une étanchéité (Tab. 1).

La géomembrane comme le géosynthétique bentonitique sont utilisés au sein d'un dispositif d'étanchéité par géosynthétiques (DEG) (Fig. 8). Ces dispositifs sont décrits en détail dans les normes NF P84-500 et XP P84-700 [3, 4].

Définition

- L'étanchéité est définie comme la prévention ou la limitation de la migration de fluides. Les fluides peuvent migrer sous l'action d'une différence de charge hydraulique : c'est l'advection. Ils peuvent également migrer sous l'action d'une différence de concentration : c'est la diffusion.



Figure 8. Dispositif d'étanchéité par géosynthétiques (DEG).

Tableau 1 : Fonctions principales assurées par les principaux géosynthétiques élémentaires [6]

	Géotextile	Géoespaceur	Géogrille	Géoconteneur	Géomembrane	Géosynthétique bentonitique
Étanchéité					x	x
Protection	x			x		
Drainage	x	x				
Filtration	x		x	x		
Séparation	x					
Renforcement	x		x	x		
Résistance à l'érosion	x	x		x		

1.3.3. Notion de dispositif d'étanchéité drainage (DEG) par géosynthétiques

Un DEG est constitué d'une structure support, d'une structure d'étanchéité (géomembrane, géosynthétique bentonitique ou combinaison d'un ou plusieurs de ces éléments) et d'une structure de recouvrement. Les structures support et de recouvrement ont pour objectif de protéger la structure d'étanchéité de manière à assurer que la fonction étanchéité puisse être remplie tout au long de la durée de vie de l'ouvrage. Elles ont également pour fonction d'assurer le drainage des eaux ou des gaz qui peuvent se situer sous le géosynthétique d'étanchéité. On évite ainsi, par exemple, un soulèvement de la géomembrane lié à un dégazage dû à la dégradation de matière organique ou à une remontée de la nappe aquifère. Celui-ci pourrait en effet conduire à des déformations inacceptables de la géomembrane (cf. 2.2).

1.3.4. Dimensionnement par fonction des géosynthétiques

Le Comité français des géosynthétiques (CFG) a introduit la notion de dimensionnement par fonction. À partir de la connaissance de l'ouvrage, on établit, par le biais de méthodes de dimensionnement propres à chaque fonction, des spécifications pour le choix des géosynthétiques.

Les principes et règles de dimensionnement d'ouvrages incluant des géosynthétiques sont précisés dans des normes ou des recommandations du CFG. Le chapitre 6 de ce document reviendra plus en détail sur ces notions pour un certain nombre des fonctions précitées.

Dans le dimensionnement par fonction, on doit dans un premier temps définir toutes les fonctions recherchées pour chaque composant identifié dans l'ouvrage. Puis, pour chaque fonction, on définit les caractéristiques requises pour le dimensionnement. Elles sont réparties entre caractéristiques fonctionnelles, de mise en œuvre et de durabilité (long terme).

D'autres propriétés que celles relatives à la fonction principale du géosynthétique dans l'ouvrage peuvent ainsi être nécessaires pour le dimensionnement. Par exemple, un géosynthétique de séparation ou de renforcement ne doit pas être un obstacle infranchissable aux écoulements d'eau dans le sol, aussi faibles soient-ils. Ou bien encore, un géosynthétique de drainage ou de filtration doit pouvoir conserver ses propriétés même lorsqu'il est soumis à des efforts de traction.

Par ailleurs, quels que soient l'application et l'ouvrage, la mise en œuvre doit pouvoir être réalisée sans détérioration ou modification des caractéristiques du géosynthétique susceptible d'altérer ou de réduire son aptitude à remplir sa fonction. Ceci peut survenir par exemple lorsque le géosynthétique est mis en contact avec un sol boueux (risque de colmatage) ou constitué de granulats agressifs, ce qui peut conduire à un endommagement. Cet aspect doit être pris en compte lors du dimensionnement ou de la mise en œuvre.

C'est seulement à l'issue du dimensionnement par fonction que le cahier des charges sera établi et les matériaux naturels ou géosynthétiques sélectionnés.

Les géosynthétiques et le développement durable

Selon la définition proposée en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, le développement durable est : « Un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (...) ».

Face à l'urgence de la crise écologique et sociale qui se manifeste désormais de manière mondialisée, le développement durable est une réponse de tous les acteurs (états, marché, société civile) pour reconsidérer la croissance économique à l'échelle mondiale afin de prendre en compte les aspects environnementaux et sociaux du développement. Tous les secteurs d'activité sont concernés.

Il en va ainsi des applications des matériaux géosynthétiques. Leur utilisation permet en effet de préserver les ressources naturelles, par exemple en réduisant les quantités de matériaux prélevés dans le milieu naturel (granulats, sable, argile), en remplaçant un filtre granulaire par un géotextile de filtration, une couche granulaire par un géocomposite de drainage, ou bien une couche d'argile par des géomembranes et géosynthétiques bentonitiques. Les prélèvements d'eau souterraine et de surface sont ainsi réduits, par utilisation de géosynthétiques dans les bassins, canaux et retenues d'altitude. Leur emploi favorise également la protection des ressources en eau par la limitation des transferts de pollution grâce à l'utilisation de géosynthétiques d'étanchéité et de drainage. Ils contribuent enfin à réduire la dépendance aux énergies fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. En effet, bien que les ouvrages utilisant des géosynthétiques nécessitent la consommation d'énergie fossile au même titre que les autres matériaux de construction, y compris pour la fabrication des géosynthétiques, la quantité de matériaux à transporter est notablement réduite par rapport à une solution conventionnelle : les géosynthétiques sont donc beaucoup plus performants que les autres matériaux du génie civil, si l'on rapporte leur performance à la masse de matériau utilisé.

Certains aspects de l'utilisation des matériaux géosynthétiques sont à la fois sociaux et environnementaux. En effet, les matériaux géosynthétiques participent à la protection des hommes contre les risques naturels en facilitant la prévention ou en limitant les effets de l'érosion, des effondrements, des séismes, des inondations et des glissements de terrain.

D'un point de vue social et sociétal, les matériaux géosynthétiques facilitent le transport des hommes par leur utilisation dans les infrastructures de transport.

Enfin, les matériaux géosynthétiques sont utilisés pour l'amélioration du cadre de vie, notamment pour l'aménagement, la préservation et la réhabilitation des paysages et des écosystèmes dégradés, dans les bassins d'agrément, en tant que support de végétalisation des talus, berges de cours d'eau et côtes.

1.4. Durée de vie

Afin d'obtenir une durée de vie en adéquation avec la fonction du géosynthétique dans l'ouvrage, les concepteurs doivent prendre en compte les facteurs environnementaux impactant la pérennité des géosynthétiques. Le vieillissement des géosynthétiques exposés est principalement dû au rayonnement ultraviolet, à la chaleur et à l'oxygène, mais aussi à d'autres facteurs climatiques tels que l'humidité, la pluie... [7].

Une caractérisation adéquate des matériaux en contact avec les géosynthétiques est par ailleurs essentielle pour une bonne prise en compte de la durabilité des géosynthétiques enfouis : pH, présence d'oxygène, agressivité chimique, teneur en eau, température, matière organique et micro-organismes.

1.4.1. Rayonnement ultraviolet

Selon leur composition, les géosynthétiques sont plus ou moins sensibles à l'action du rayonnement ultraviolet.

Leur comportement est amélioré par l'adjonction de stabilisants à leur formulation de base.

La mise en place d'une structure de protection supprime ce problème.

La cinétique de dégradation des géosynthétiques liée aux rayonnements ultraviolets dépend également de l'ensoleillement de la localisation géographique (altitude, orientation des talus) de l'ouvrage.

1.4.2. Oxydation

Le phénomène d'oxydation dégrade les caractéristiques mécaniques des géosynthétiques. Ce phénomène est lié à la présence d'agents oxydants au contact des géosynthétiques (oxygène, ozone, effluents...). Selon leur composition, les géosynthétiques sont plus ou moins sensibles à l'oxydation.

1.4.3. Micro-organismes

L'expérience montre que de manière générale les géosynthétiques résistent à l'action des micro-organismes. Cependant certains doivent faire l'objet d'un traitement spécifique.

1.4.4. Compatibilité chimique

Le concepteur doit choisir les géosynthétiques adéquats (ce qui peut parfois nécessiter des essais préliminaires de compatibilité en phase de conception) en fonction de leur bonne compatibilité chimique avec le produit stocké (liquide, solide, gaz).

Les conditions de service de l'ouvrage doivent être définies dès le départ (par exemple : type du produit stocké, dans le cas d'un bassin). Toute modification de ce produit doit être proscrite sans étude de compatibilité chimique préalable. La résistance chimique d'un géosynthétique, au contact d'un produit donné, dépend des facteurs suivants :

- concentration du produit stocké (compatibilité en fonction des concentrations moyennes annuelles et pics de concentration) ;
- temps de contact ;
- température (compatibilité en fonction des températures moyennes annuelles et pics de température) ;
- pH (compatibilité en fonction des pH moyens annuels et pics de pH).

Remarque

- Seules sont abordées ici les sollicitations physico-chimiques. La combinaison d'actions physico-chimiques et mécaniques accélère le vieillissement. De plus, une perte immédiate de la fonction du géosynthétique peut être observée à l'installation si la conception de l'ouvrage utilisant des géosynthétiques, leur pose et le contrôle de la pose ne sont pas effectués dans les règles de l'art.

1.4.5. Durée de vie des géotextiles

Les exigences concernant le temps maximum d'exposition et éventuellement le coefficient de réduction correspondant sont définis dans la norme NF EN 13251 [8] et dans le guide ISO TR 20432 [9]. À moins que les géotextiles ne soient destinés à être recouverts rapidement, ils doivent être soumis à l'essai accéléré de résistance aux agents climatiques selon la norme NF EN 12224 [10]. La résistance résiduelle du géotextile ou du produit apparenté à l'issue de l'essai, ainsi que l'application spécifique du produit, définiront la durée pendant laquelle le matériau peut rester exposé sur le site. Les durées maximales d'exposition sont données dans le tableau 2. En cas d'exposition prolongée, il faut donc s'assurer, auprès du fournisseur, de la résistance résiduelle du produit à l'issue de la période d'exposition ou envisager des solutions alternatives de protection ou d'autres dispositions constructives.

Tableau 2 : Durée maximale d'exposition des géotextiles et produits apparentés [10]

Application	Résistance résiduelle après essai de vieillissement	Durée maximale d'exposition pendant la mise en œuvre
Renforcement ou autres applications dans lesquelles la résistance à long terme est un paramètre significatif	> 80 %	1 mois ⁽¹⁾
	60 à 80 %	2 semaines
	< 60 %	1 jour
Autres applications	> 60 %	1 mois ⁽¹⁾
	20 à 60 %	2 semaines
	< 20 %	1 jour

⁽¹⁾ Une exposition allant jusqu'à quatre mois peut être acceptable en fonction de la saison et de la situation géographique en Europe.

1.4.6. Durée de vie des géomembranes.

Les géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD) sont celles pour lesquelles le plus de connaissances sont disponibles quant à leur durabilité dans les installations de stockage de déchets. Des experts [11] proposent une synthèse des connaissances relatives à la durabilité des géomembranes en PEHD dans les installations de stockage de déchets. Comme pour les autres polyoléfinés, le mécanisme de vieillissement de ces géomembranes est l'oxydation. Il n'existe pas aujourd'hui de modèle fiable pour prédire la durée de vie des géomembranes en PEHD dans cette application. Il manque en effet à l'heure actuelle une analyse d'échantillons vieillis *in situ* pendant des durées de 10 ans au moins pour pouvoir valider les modèles.

C'est dans le cadre des ouvrages hydrauliques que le plus grand nombre d'études a été effectué sur la durabilité. Des publications récentes font état de bons comportements des géomembranes en PEHD de 17 ans [12], en éthylène propylène diène terpolymère (EPDM) pour une durée de 21 ans [13], en bitume élastomère de 30 ans lorsqu'il est exposé [14], en bitume oxydé de 30 ans lorsqu'il est protégé [15], en polychlorure de vinyle plastifié (PVC-P) renforcé de 25 ans [16]. À noter que ces durées ne correspondent pas à une rupture de l'étanchéité mais à l'âge le plus élevé de la géomembrane au moment de son prélèvement. On peut donc espérer des durées de vie plus importantes que celles citées précédemment en l'absence de sollicitations mécaniques.

2. OUVRAGES HYDRAULIQUES

Les applications hydrauliques des géosynthétiques correspondent à un vaste domaine d'applications (Fig. 9).

Ces applications recouvrent leur utilisation dans les barrages – dont les retenues d'altitude –, dans les canaux, les réservoirs de stockage d'eau et les couvertures flottantes de stockage d'eau potable [17].

Dans la suite de ce chapitre, on rappelle brièvement l'historique de l'utilisation des géosynthétiques dans les ouvrages hydrauliques et la diversité des matériaux qui peut y être rencontrée. On donne ensuite les grands principes relatifs à la conception des ouvrages hydrauliques, afin d'assurer un fonctionnement optimal des géosynthétiques dans ces ouvrages.



© Bec Frères



© Soprema



© Soprema

Figure 9. Quelques exemples d'ouvrages hydrauliques étanchés par géosynthétiques.

2.1. Historique

L'utilisation des géosynthétiques dans les ouvrages hydrauliques remonte aux années 1940 et s'est vraiment étendue à partir des années 1960 et 1970. Les applications hydrauliques représentent la première utilisation des géomembranes pour l'étanchéité des ouvrages.

Les premières utilisations ont conduit, à partir de retours d'expérience, à l'amélioration des pratiques dans différents domaines :

- **L'amélioration physico-chimique des matériaux et de leurs composés** : on a ainsi vu apparaître une variété de polymères au-delà des géomembranes bitumineuses comme le polyéthylène chloré (CPE), le polyéthylène chlorosulfoné (CSPE) – aussi connu sous le nom de « Hypalon » –, le PVC-P, le néoprène, l'EPDM, le PEHD, le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polypropylène flexible (PP-f) pour les principaux.

Les applications hydrauliques sont celles dans lesquelles on trouve la plus grande diversité de géomembranes utilisées, car ce sont celles où les risques d'incompatibilité chimique sont les plus limités ;

- **L'inclusion de matériaux de renforcement** : cette technique utilisée initialement dans la fabrication des géomembranes bitumineuses a également été appliquée aux géomembranes CPE, CSPE et PVC-P ;

- **La conception de couches additionnelles nécessaires au maintien de la fonction étanchéité de la géomembrane** : ainsi le matériau support doit être préparé avant la pose de la géomembrane et des couches de géosynthétiques destinées à assurer la fonction de drainage ou de protection peuvent être mises en place sur la géomembrane (cf. 1.3.3).

Parmi les ouvrages anciens, on peut citer : le réservoir du pont de Claix (40 ans) [18], le barrage de Contrada Sabetta du lac Baitone [19] et les tranchées drainantes de Roissard [20].

Le premier géotextile utilisé dans un barrage est, à notre connaissance, un géotextile non tissé utilisé comme filtre à Valcros en 1970 [21].

Dans la suite de ce document la fonction de filtration interne des barrages, qui n'est pas une application courante, n'est pas abordée bien qu'elle demande une grande technicité. On se focalise principalement sur la conception des dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques (DEG) pour les bassins, les barrages et les canaux.

Des éléments sont également apportés en matière d'applications courantes de géotextiles filtrants et de tubes géosynthétiques.

2.2. Conception des DEG

2.2.1. Préparation du support

Le support doit être exempt de tout végétal ou de toute matière organique pour éviter les risques de dégazage sous la géomembrane. Tous les éléments potentiellement agressifs doivent être éliminés. Le support doit ensuite être compacté dans les règles de l'art. On évitera ainsi au maximum le risque d'endommagement de la géomembrane.

2.2.2. Drainage et protection sous la géomembrane

Il n'est en général pas recommandé, dans le cas des ouvrages hydrauliques, de poser directement la géomembrane sur le fond de forme, sauf lorsque tout risque de poinçonnement ou de dégazage a été définitivement écarté.

Pour écarter ces risques, on peut avoir recours à des géosynthétiques.

Remarque

- Il est important de noter que c'est le cas contraire à ce qui est préconisé pour le fond et les flancs des installations de stockage de déchets où un contact intime entre la géomembrane et l'argile compactée est recommandé.

L'objectif d'un drainage de l'eau sous la géomembrane est de prévenir l'accumulation des fuites éventuelles, ainsi que les risques de sous-pression. De nombreux matériaux, dont des géocomposites drainants, peuvent assurer ces fonctions (géobandes).

Le drainage des gaz est également essentiel lorsque des remontées de nappe sont attendues ou que toute la matière organique n'a pas pu être enlevée.

Les pratiques actuelles tendent à découpler les systèmes de drainage de liquides de ceux des gaz.

Une couche de protection, souvent un géotextile, peut être interposée entre le fond de forme et la géomembrane si le support n'est pas assez lisse pour garantir le maintien de l'intégrité de celle-ci.

2.2.3. Protection et recouvrement

Une des meilleures manières de prévenir le vieillissement des géosynthétiques, et des géomembranes en particulier, est de les couvrir pour limiter leur exposition aux conditions climatiques.

La couche recouvrant la géomembrane aura pour effet de prévenir le risque d'endommagement :

- par des solides transportés ou flottants ;
- par des engins ou des machines telles des pompes ;
- par des animaux fouisseurs ou des racines de végétaux ;
- par le vandalisme ou des actions humaines.

La nécessité de recouvrir la géomembrane diffère d'une application hydraulique à une autre [22]. Il semble toutefois que, dans la plupart des ouvrages hydrauliques, la géomembrane reste exposée.

La configuration la plus courante, lorsque la géomembrane est protégée, est le recouvrement par un géotextile, lui-même recouvert de matériaux granulaires, de dalles en béton ou de pavés autoblocants [23].

Les actions mécaniques liées au passage d'engins nécessitent la mise en œuvre de dalles de béton ou de béton projeté sur la géomembrane.

Une protection locale peut également être envisagée lorsque des zones particulières ont été identifiées.

Une alternative à l'utilisation des géomembranes pour l'étanchéité des ouvrages peut être le recours à l'utilisation de géosynthétiques bentonitiques.

Dans tous les cas, l'utilisation des géomembranes, comme celle de géosynthétiques bentonitiques, doit être effectuée dans le respect des règles de l'art. On pourra utilement se référer aux fascicules 10 et 12 du Comité français des géosynthétiques (CFG) [7, 24].

2.2.4. Singularités

Des singularités existent dans les ouvrages hydrauliques. Il s'agit par exemple des ancrages, des voies d'accès à l'ouvrage, des jonctions de l'étanchéité à des ouvrages comme des puits, des canalisations en béton ou des murs.

Des éléments relatifs aux dispositions constructives pour ces points particuliers peuvent être trouvés par exemple dans le fascicule 10 du CFG [7].

2.3. Géotextiles filtrants

Afin de protéger les ouvrages hydrauliques (digues côtières, berges de cours d'eau...) des effets de l'érosion de l'eau, des structures de protection doivent être mises en place. Elles comprennent deux zones à vocations bien différentes [25] :

- **la zone externe doit dissiper l'énergie hydraulique apportée par les vagues** : on retrouve ici soit des enrochements soit des éléments préfabriqués en béton, dénommés blocs dans la suite de ce document ;

- **sous ces blocs, la zone inférieure de la structure en contact direct avec le sol doit avoir une fonction de filtration** : elle doit éviter l'érosion du sol soumis aux écoulements d'eau qui ressortent du massif au rythme de la houle (Fig. 10).

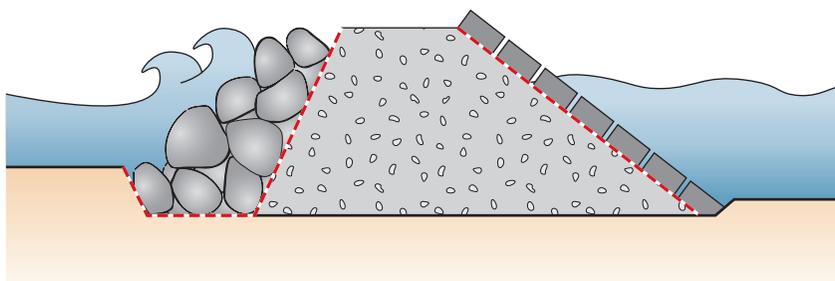


Figure 10. Schéma d'utilisation d'un géotextile en filtration sous enrochement.

Une rupture ou un dysfonctionnement du système de filtration, dus soit à un lessivage du sol soit à un colmatage du filtre, peuvent avoir des conséquences sévères sur la stabilité globale de l'ouvrage hydraulique.

Les géotextiles peuvent remplir ce rôle de couche protectrice en servant de filtre sous les enrochements. Ils sont plus simples à mettre en œuvre que des couches de matériaux granulaires et ont fait leurs preuves en termes d'économie et de fiabilité.

Par ailleurs, ces géotextiles doivent présenter des caractéristiques mécaniques et de souplesse suffisantes pour résister aux agressions lors de l'installation des enrochements de plusieurs centaines de kilogrammes, comme le montre la figure 11.



Figure 11. Géotextile de filtration sous enrochement (© TenCate).

2.4. Tubes géosynthétiques

Dans le domaine de la protection côtière, des techniques de réalisation de corps de digues en tubes de géosynthétiques se développent pour combattre l'érosion ou permettre la construction d'infrastructures côtières. Le tube maintient le sol contenu en place, empêchant ainsi l'érosion et les dommages matériels.

Cette technique très simple peut tout à fait être réalisée pour des aménagements d'ampleur tels que la création d'îles ou le gain de terres sur la mer, voire des aménagements plus petits comme la sécurisation d'un terrain privé (Fig. 12).

Les tubes géosynthétiques sont empilables. Ils peuvent donc composer le noyau d'une digue de protection, ou protéger le pied d'une digue (comme ce fut le cas, par exemple, pour l'aménagement de Port-Médoc en 2003), tout en utilisant les matériaux sableux présents sur site [26]. Les figures 13 et 14 présentent l'utilisation des tubes géosynthétiques sur le chantier de Port-Médoc.

D'autres utilisations des tubes géosynthétiques sont faites dans le domaine de l'aménagement côtier. Ils sont par exemple employés immergés. Ils forment alors une digue sous-marine qui permet d'atténuer la houle et de limiter l'impact des vagues sur les plages (ex. : ville de Cannes – Fig. 15).

Figure 12. Schéma d'aménagement simple pour limiter l'érosion d'un terrain par tubes géosynthétiques.

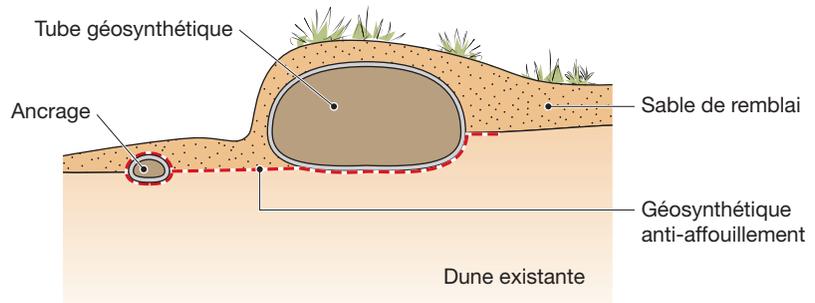


Figure 13. Photographie du chantier en tubes géosynthétiques de Port-Médoc (© O. Artières).

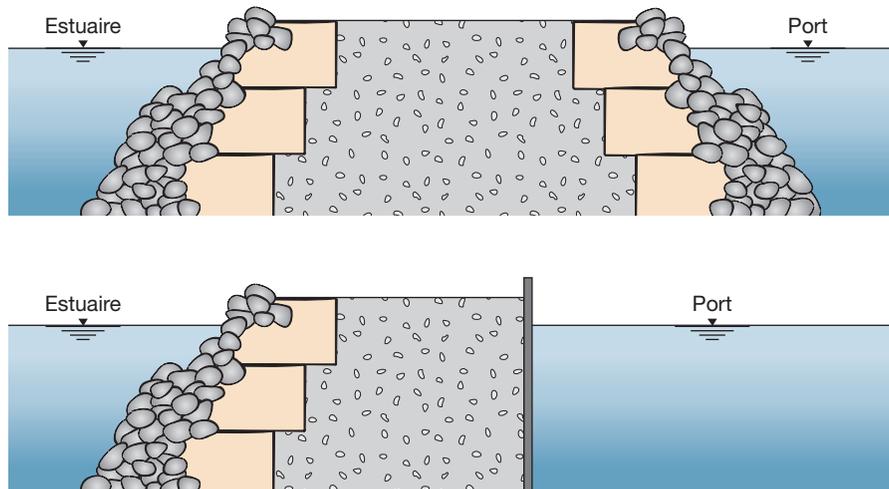


Figure 14. Schéma d'aménagement en tubes géosynthétiques.

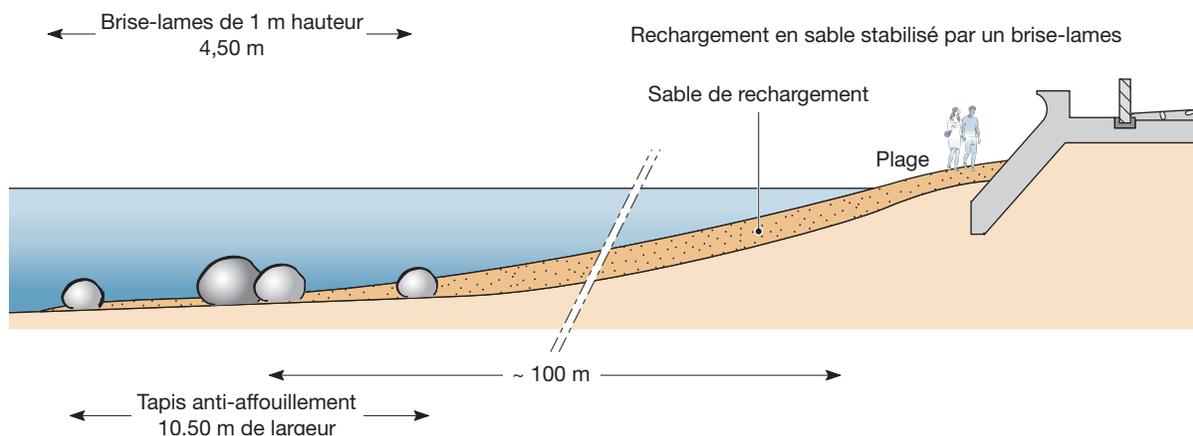


Figure 15. Plan schématique des tronçons en tubes géosynthétiques pour la protection des plages de la Croisette à Cannes.

3. ROUTES ET INFRASTRUCTURES LINÉAIRES

3.1. Généralités

Les géosynthétiques trouvent une application dans de nombreux aménagements routiers et d'infrastructures linéaires. Ils interviennent dans ce type d'application très souvent en remplacement ou en optimisation technique et économique d'autres solutions. En prenant l'exemple d'une construction de route, les géosynthétiques sont présents dans les applications suivantes (Fig. 16) :

- En séparation, sous la couche de forme afin de préserver les caractéristiques de la couche de forme (❶).
 - En base de remblais, pour permettre de construire sur des sols peu porteurs voire compressibles, ou encore sur des zones à risque karstique (❷).
 - Dans des tranchées en tant qu'éléments filtrants entre les matériaux en place et les matériaux drainants de la tranchée (❸).
 - Dans des pentes de talus pour éviter l'érosion avant la végétalisation du rampant (❹).
 - Dans des merlons ou des remblais pour raidir les talus ou réaliser des murs de soutènement. Il est ainsi possible de réaliser des élargissements de voies, des merlons de protection, ou anti-bruit par exemple, en limitant les emprises au sol (❺).
 - À l'intérieur des structures de chaussées enrobées pour ralentir la remontée des fissurations des couches inférieures (❻)
- (cf. 3.3).

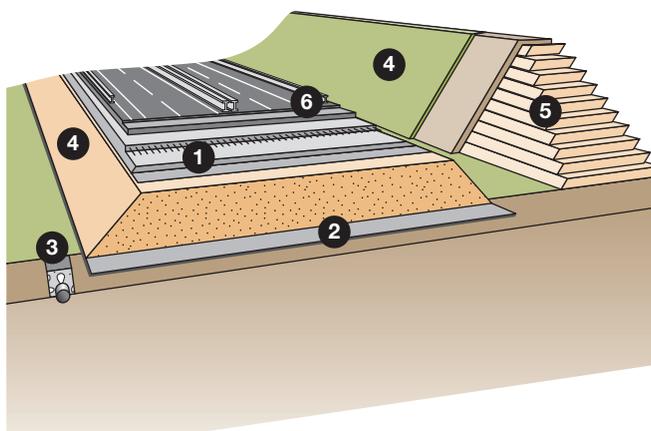


Figure 16. Applications des géosynthétiques dans les infrastructures linéaires.

3.2. Terrassements routiers et ferroviaires

La première utilisation des géotextiles dans les terrassements est celle de séparation (anti-contaminant). Elle est prévue par exemple par le guide des terrassements routiers [27] :

« L'intercalation d'un géotextile anti-contaminant entre une couche de forme en matériau granulaire et un sol fin sensible à l'eau, humide, permet de sauvegarder les caractéristiques du matériau granulaire et de réduire ainsi l'épaisseur de la couche de forme. »

Le principe est ici d'éviter la pollution des matériaux granulaires d'apport par les matériaux fins des couches sous-jacentes en place. On utilise alors un géotextile de séparation. Les géotextiles non tissés sont ainsi privilégiés, leur grande déformabilité étant un avantage (Fig. 17).



Figure 17. Exemples de déformation des géotextiles non tissés.

Si les sols en place présentent de très fortes teneurs en eau, il peut être intéressant d'utiliser des géosynthétiques de renforcement afin de limiter les épaisseurs de couche de forme ou d'éviter une substitution des matériaux du sol.

Plusieurs solutions, allant du géotextile tissé à la géogrille en passant par des géocomposites, peuvent être utilisées. Il est important dans cette application de conserver une fonction anti-contaminant (séparation). Une géogrille sera ainsi associée à un géotextile de séparation à la base de la couche de forme, la géogrille étant placée dans le matériau granulaire de la couche de forme (Fig. 18). Les géotextiles tissés et les non-tissés renforcés peuvent être utilisés à la base du terrassement (Fig. 19).



Figure 18. Utilisation d'une géogrille en renforcement de couche de forme (© TenCate).



Figure 19. Utilisation d'un géotextile tissé en renforcement de couche de forme (© TenCate).

Quelle que soit la solution choisie, il est recommandé d'avoir une épaisseur de matériaux d'au moins 0,2 m au-dessus du géotextile ou de la géogrille afin d'ancrer correctement le géosynthétique.

Les intérêts de ces solutions de renforcement de la couche de forme et/ou de substitution à la base du terrassement sont multiples :

- réduction des épaisseurs des couches granulaires ;
- diminution du volume de terrassement ;
- réduction des évacuations en filière de traitement de déchets ;
- gain de temps ;
- économie sur la globalité du chantier.

3.3. Anti-fissuration de chaussées

Depuis plusieurs dizaines d'années, les géotextiles sont également utilisés pour ralentir les remontées de fissures (Fig. 20). Plus récemment, l'utilisation, notamment, de fibres de verre dans les géotextiles a permis de renforcer plus efficacement les chaussées, en construction ou en rénovation. Une norme s'applique à ce domaine (NF EN 15381 [28]). Pour autant il n'existe pas encore de méthode normalisée pour le dimensionnement de ces solutions.

L'enjeu principal de l'utilisation des géotextiles dans les chaussées est d'allonger la durée de vie de la couche de roulement et donc d'espacer au maximum les opérations d'entretien.

Le premier objectif de l'interposition d'un géotextile est de servir de support à la couche d'imperméabilisation de la structure de chaussée. Un géotextile non tissé de porosité importante permet ainsi de servir de réservoir pour le bitume entre le support (couche de forme, fondation ou base) et la couche de roulement (Fig. 20).

En effet, que ce soit sur des couches traitées aux liants hydrauliques qui subissent des fissurations de retrait ou sur des couches bitumineuses dont la fissuration est due au durcissement et à la fatigue de l'enrobé, il est important de préserver les couches inférieures des entrées d'eau. Un surdosage de bitume résiduel permet d'obtenir une couche imperméable [29]. L'association américaine AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) a quantifié le minimum de rétention de bitume à 0,9 L/m² pour un géotextile afin d'assurer la fonction étanchéité. Cette information est reprise dans la norme NF EN 15381.

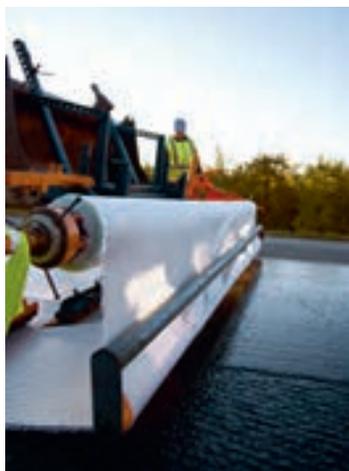


Figure 20. Application d'un géosynthétique anti-fissuration de chaussée (© F. Roussy).

Le Stac (Service technique de l'aviation civile) a réalisé en 1999 un guide sur l'utilisation des techniques anti-remontées de fissures [30]. La solution avec géotextile non tissé est comparée à des solutions de retraitement ou d'utilisation de sable enrobé. La solution avec géosynthétique apparaît comme la plus économique.

Si un géotextile non tissé est suffisant dans l'entretien courant des routes, il existe certains cas où les géocomposites ou géogrilles composés de fibres de verre ou d'autres polymères comme le polyester prennent le relais :

- en renforcement de chaussée sur des anciennes chaussées en béton ;
- en renforcement partiel de fissures longitudinales ou lors d'un élargissement, au contact de l'ancienne et de la nouvelle chaussée ;
- en renforcement d'une chaussée lors d'une réparation au-dessus d'une tranchée.

Quel que soit le produit utilisé, l'installation présente des constantes :

- préparation et nettoyage du support ;
- comblement des fissures larges ou autres dégradations ;
- fracturation des dalles dans le cas de la pose sur des dalles béton ;
- pose de l'émulsion de bitume selon le dosage recommandé en fonction du support et du géosynthétique utilisé ;
- installation du géotextile après avoir attendu la rupture de l'émulsion.

Enfin si les solutions de renforcement de structures de chaussée sont intéressantes d'un point de vue économique, elles ne se substituent pas à la réalisation d'un diagnostic de la structure existante. Certaines structures anciennes peuvent être dans un état de fatigue trop important pour supporter le trafic même avec un géosynthétique anti-remontées de fissures.

3.4. Base de remblais

En plus de la fonction de séparation à la base du remblai, les géotextiles sont utilisés en renforcement dans les cas suivants :

- sur les sols compressibles ;
- au-dessus des inclusions rigides ;
- au-dessus des zones karstiques.

3.4.1. Sur les sols compressibles

Pour la réalisation de remblais sur des sols mous et/ou compressibles, on peut observer :

- des problèmes de stabilité générale du remblai dus aux faibles caractéristiques mécaniques du support ;
- des problèmes de tassements du remblai dus à la consolidation des sols sous-jacents.

L'utilisation des géosynthétiques de renforcement en base des remblais permet d'améliorer les conditions de stabilité (Fig. 21). Même si le géosynthétique ne réduit pas les amplitudes des tassements, il permet de les lisser et d'éviter des ruptures localisées, provoquées par les tassements différentiels et les terrains hétérogènes.

Cette solution de renforcement par géosynthétiques permet d'optimiser notamment la durée du chantier et les emprises de terrassement par comparaison aux solutions classiques (construction par étapes ou réalisation de bermes [interruptions intermédiaires]). Elle est aussi plus économique, comparée aux solutions utilisant des colonnes ballastées ou traitées au ciment, et plus écologique car elle limite les volumes de purge.

Les nappes de géosynthétiques généralement utilisées sont plus résistantes en traction dans la direction transversale à l'ouvrage linéaire (Fig. 22). Il est donc nécessaire de faire attention au sens de la pose du géosynthétique.

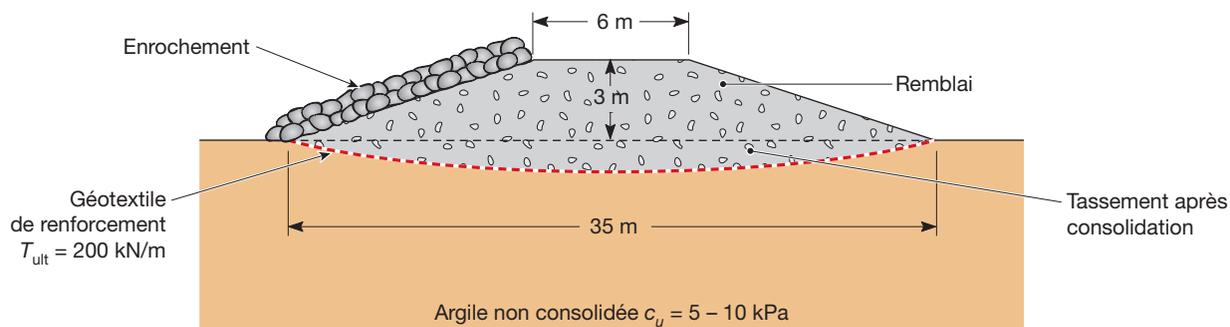


Figure 21. Exemple de remblai sur sol compressible renforcé par géosynthétiques.

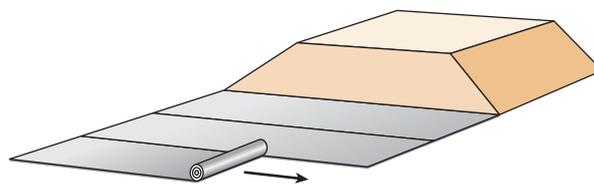


Figure 22. Orientation de pose des géosynthétiques de renforcement en base des remblais.

3.4.2. Dans le matelas de répartition des inclusions rigides

Dans le cas de l'amélioration des sols par inclusions rigides, on utilise des inclusions qui ne sont pas liées par des éléments rigides.

La transmission des efforts venant de l'ouvrage est assurée par une plate-forme ou matelas de transfert de charge constitué de matériaux granulaires (Fig. 23).

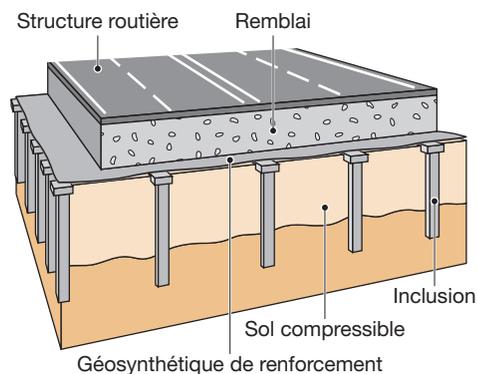


Figure 23. Application d'un géosynthétique de renforcement sur inclusions rigides.

L'application des géosynthétiques en renforcement du matelas de transfert de charge sur inclusions est apparue dans les années 1980, mais son développement en France est plus récent.

Le projet de recherche national Asiri (Amélioration de sols par inclusions rigides), lancé en 2002 et associant de nombreux professionnels et des universités, a permis de démontrer l'importance du géosynthétique dans le transfert de charge et son comportement en déformation [31].

Le renforcement est constitué d'un géosynthétique placé en général à la base du matelas de transfert de charge et peut être éventuellement complété par d'autres nappes positionnées dans l'épaisseur du matelas. Le renforcement par géosynthétiques reprend une partie des charges du remblai et la reporte sur les inclusions (Fig. 24).

Le principal bénéfice de cette technique est l'optimisation de la structure par une meilleure combinaison espacement – dimension des têtes d'inclusion.

En plus de l'amélioration du transfert de charge, un géosynthétique de renforcement, positionné perpendiculairement à l'axe du remblai, permet de reprendre les efforts horizontaux engendrés par la poussée latérale du remblai et donc d'éviter d'incliner ou de renforcer les inclusions sous les bordures de remblais.

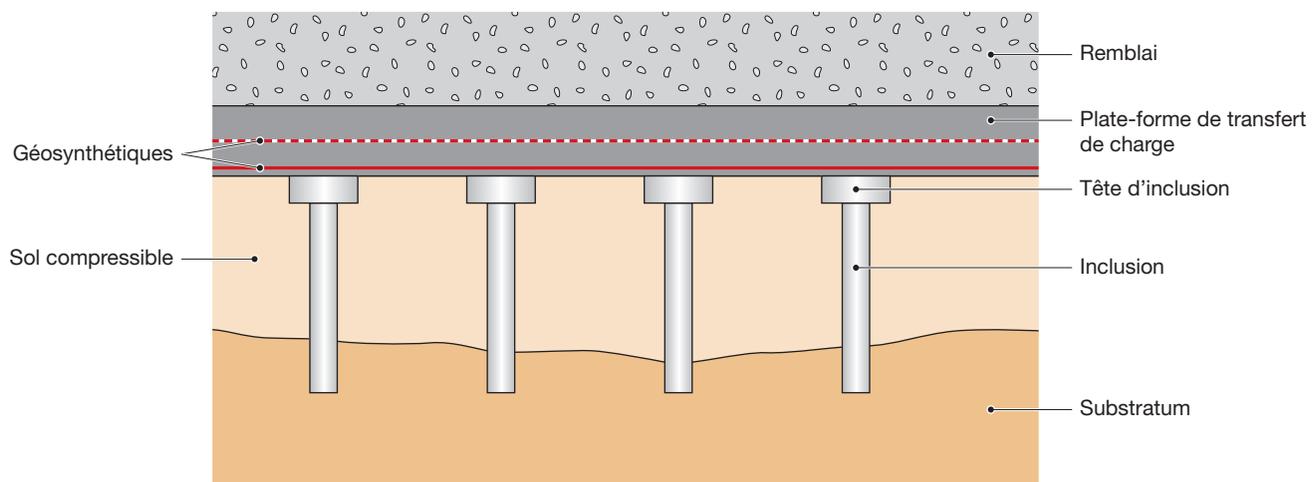


Figure 24. Schéma de principe du renforcement sur inclusions rigides.

3.4.3. Au-dessus des zones karstiques

Dans des zones karstiques, les géosynthétiques peuvent être utilisés pour renforcer la base du remblai et éviter la ruine de l'ouvrage (Fig. 25). Ainsi le renforcement par géosynthétiques a pour but essentiel de préserver la sécurité des usagers en évitant tout effondrement brutal de l'ouvrage. Il permet d'assurer l'utilisation de l'ouvrage en limitant sa déformation à une valeur tolérable, pour la durée comprise entre le moment où l'effondrement s'est produit et le déclenchement des opérations de traitement de la cavité.

La connaissance des mécanismes de fonctionnement des renforcements par géosynthétiques s'est considérablement développée, en particulier grâce aux programmes de recherche entrepris comme le projet Rafael (Renforcement des assises ferroviaires et autoroutières contre les effondrements localisés) [32].

En fonction de la taille de la cavité, de l'épaisseur de la structure, le renforcement permet d'éviter ou de limiter les désordres en surface pour la durée définie par le maître d'ouvrage (Fig. 26).

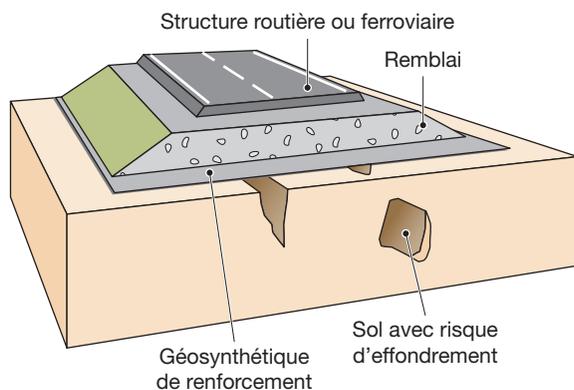


Figure 25. Application d'un géosynthétique de renforcement sur cavités.

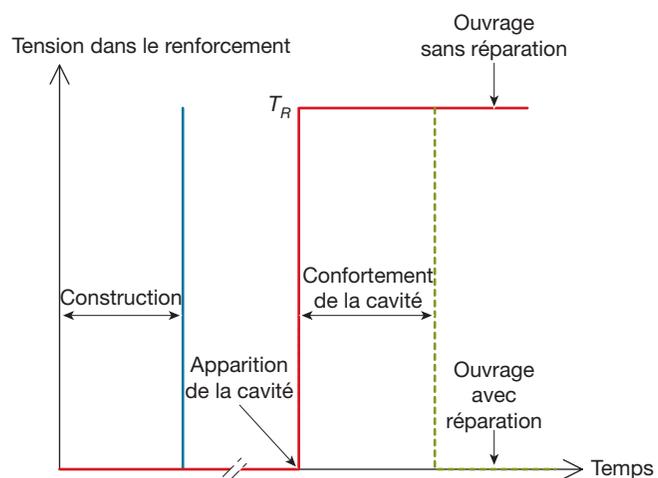


Figure 26. Deux options pour le renforcement sur cavités.

Après la construction du remblai, le renfort géosynthétique demeure dans un état de tension nulle jusqu'à ce qu'un vide apparaisse sous le remblai. Le géosynthétique se met alors en tension et permet de supporter les charges du remblai.

Dans le cas d'un traitement spécifique (comblement de la cavité par exemple), la tension dans le renforcement sera ramenée à une valeur nulle.

Selon la stratégie d'entretien adoptée, le renfort pourra continuer à soutenir la structure de remblai pendant le reste de la vie de l'ouvrage.

Le renforcement par géosynthétique pourra être calculé pour une durée allant de quelques jours à plusieurs dizaines d'années.

3.4.4. Drainage sous remblais

Pour les remblais routiers ou ferroviaires, un drainage par géosynthétiques permet de :

- limiter les remontées d'eau dans le corps du remblai et donc de conserver toutes les caractéristiques géotechniques des matériaux mis en œuvre (la pose est faite sous tout le remblai avec raccordement aux tranchées latérales) (Fig. 27) ;
- pour les zones compressibles, ce drainage sous remblai peut être associé à un réseau de drains verticaux (Fig. 28 et Fig. 29) permettant d'accélérer la vitesse de consolidation du sol support, et donc de diminuer le temps d'attente pour obtenir le tassement attendu.



Figure 27. Mise en œuvre du remblai sur le géocomposite de drainage (© Afitex).



Figure 28. Pose du géocomposite de drainage au contact des drains verticaux (© Afitex).

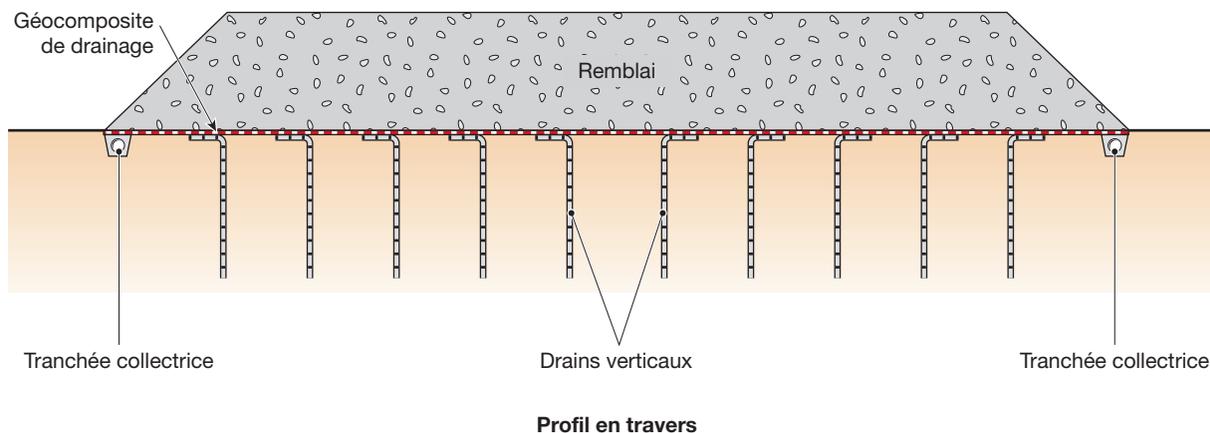


Figure 29. Drainage sous remblai sur zones compressibles.

3.4.5. Écran drainant en rive de chaussée (EDRC)

Le fonctionnement des structures de chaussée routière peut être amélioré en limitant les teneurs en eau des matériaux.

Un géocomposite de drainage placé verticalement en rive de chaussée permet :

- de collecter les eaux d'infiltration provenant du corps de chaussée ;
- de s'opposer à la migration des eaux en provenance de l'acotement.

Une tranchée de faible largeur permet de placer le drain collecteur, raccordé au géocomposite, à la profondeur nécessaire (Fig. 30 et Fig. 31).



Figure 30. Géocomposite de drainage en EDRC (© Géoroute).

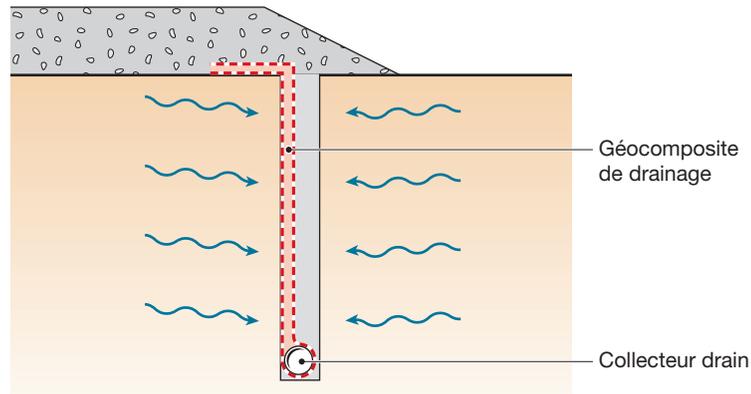


Figure 31. Géocomposite de drainage en EDRC : principe.

3.5. Filtres drains

Les géotextiles sont utilisés en tant que filtres dans de nombreux aménagements et ouvrages de terrassement (Fig. 32).

Ils sont utilisés par exemple autour de matériaux granulaires pour éviter leur contact avec des matériaux plus fins, qui risqueraient de les polluer. Ils protègent ainsi le rôle drainant dans le cas de couches drainantes sous des remblais (Fig. 33).

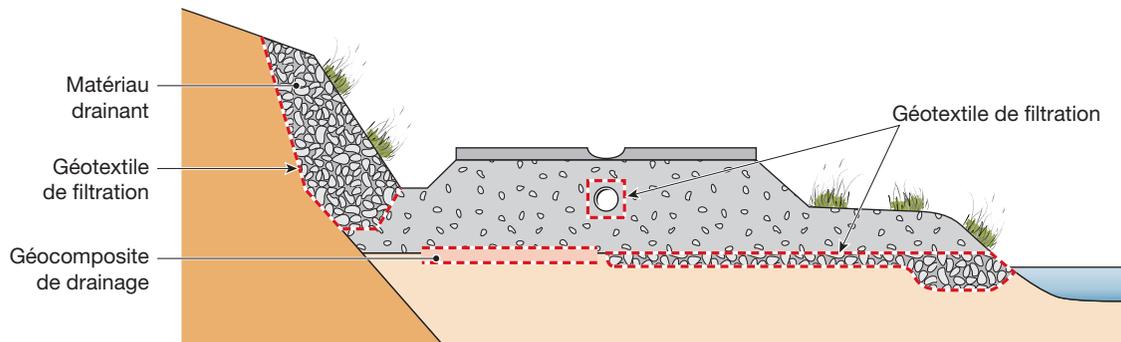


Figure 32. Applications des géosynthétiques en drainage et filtration.



Figure 33. Filtre géotextile entre un matériau fin et un matériau drainant (© TenCate).

Le filtre se place donc entre deux matériaux, de granulométries différentes. La perméabilité du filtre doit être supérieure à celle des matériaux granulaires afin de ne pas être un frein à l'écoulement de l'eau entre les matériaux. Son ouverture de filtration (cf. 6.3) doit permettre d'assurer que le sol extérieur au massif drainant ne vienne pas se mélanger avec celui-ci et le polluer par des particules fines.

Remblai renforcé par géosynthétiques : une solution économique

De nombreuses études ont porté sur l'avantage économique des remblais renforcés par géosynthétiques.

Tout d'abord, comparé aux autres solutions de soutènement (mur poids, mur béton en L, renforcement métallique...), le remblai renforcé par géosynthétiques apparaît comme la solution la moins coûteuse à hauteur équivalente (Fig. 34).

Ensuite, cette solution permet de rendre le soutènement accessible techniquement et avec des délais de réalisation très courts. Ainsi, une route effondrée peut-elle être remise en circulation à moindre coût et en quelques semaines, ou un aménagement en remblais peut-il éviter une zone inondable ou l'achat de terrains supplémentaires.

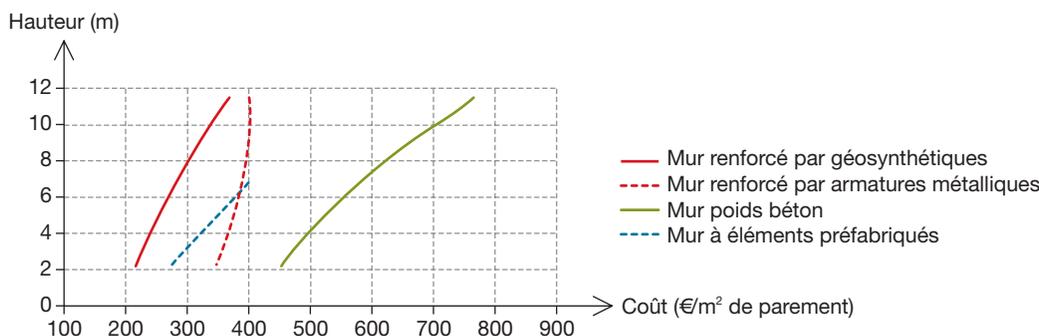


Figure 34. Étude comparative du coût de construction d'un mur selon sa technique de réalisation.

3.6. Drainage en masque drainant

Un masque drainant se définit comme une couche de matériau ou produit disposé sur un talus, une berge ou un parement de barrage en remblai à des fins de drainage.

Pour assurer la stabilité des talus routiers ou ferroviaires en zone de déblai, on réalise habituellement des masques drainants en matériaux granulaires.

Ces masques granulaires jouent un rôle par leur poids et un rôle drainant.

La solution en géocomposite de drainage permet d'assurer la fonction drainage, avec une mise en œuvre simple et rapide (Fig. 35).

Le dimensionnement doit prendre en compte les arrivées d'eau dans le talus (sources, etc.) et les eaux météoriques (pluies, etc.).

La protection du géocomposite par un matériau d'apport permet une végétalisation totale du talus (Fig. 36).



Figure 35. Géocomposite de drainage sur talus (© AfiteX).



Figure 36. Végétalisation finale du talus (© Géoroute).

3.7. Murs et talus renforcés

3.7.1. Généralités

Les premiers remblais renforcés par géosynthétiques sont apparus dans les années 1970. Ce domaine d'application, désormais normalisé (normes NF P94-270 et XP G38-064), prend toute sa place dans les projets d'infrastructures. En effet, alors que la pression foncière est de plus en plus forte, les emprises des nouveaux aménagements doivent être réduites pour des raisons économiques, voire écologiques.

Les remblais renforcés par géosynthétiques voient leurs applications dans les ouvrages et aménagements suivants :

- merlons de protection contre les éboulements rocheux et les avalanches ;
- merlons anti-bruit ;
- élargissements de voies en zone de fort dénivelé ;
- reprises de voies effondrées ;
- réalisation de remblais de pré-chargement ;
- rampes et culées de pont ;
- digues ;
- etc.

Ces types de remblais répondent aux exigences des ouvrages d'art (le dimensionnement peut prendre en compte une durée de service allant jusqu'à 100 ans).

Les géosynthétiques utilisés peuvent être des géogrilles, des géotextiles tissés de renforcement ou encore des géocomposites de renforcement.

Le choix des matériaux se fait en fonction des contraintes techniques et économiques du chantier.

Les matériaux de remblais ont une importance dans le choix du géosynthétique. Dans le cas de l'utilisation de matériaux de carrière, présentant une granulométrie calibrée, une géogrille ou un géotextile tissé sera suffisant.

Néanmoins, dans le cas de la réutilisation de matériaux de déblais, comprenant une fraction fine sensible à l'eau, il sera préférable d'utiliser un géosynthétique ou un géocomposite de renforcement, présentant une composante de drainage permettant de limiter les pressions interstitielles dans le remblai.

3.7.2. Tout type de parement

Un remblai renforcé par géosynthétiques s'associe à une multitude de parements (Fig. 37) : végétalisé, gabions, béton préfabriqué ou projeté, pierre sèche ou maçonnée, blocs en béton modulaires, pneus...

Les méthodes d'exécution varient en fonction du type de parement, mais deux grands principes se dégagent :

- soit par le retournement de la nappe géosynthétique au parement à l'aide de coffrage amovible (Fig. 38). Cette technique rustique permet par exemple de dissocier le remblai de son parement (cas des parements préfabriqués indépendants béton ou de pierres) ;
- soit par l'utilisation des éléments du parement (gabions, panneaux de treillis métalliques pliés, pierres sèches ou maçonnées, blocs béton) en tant que coffrage perdu. Le géosynthétique peut alors être lié au parement (pincement entre deux gabions par exemple) (Fig. 39).



Figure 37. Différents types de parements possibles (non exhaustif) (© F. Roussy).

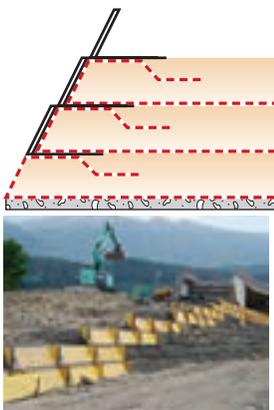


Figure 38. Principe d'installation avec coffrage amovible.

© TenCate

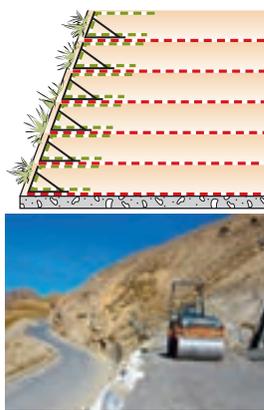


Figure 39. Principe d'installation avec coffrage perdu.

© F. Roussy

3.7.3. Drainage de massifs renforcés

La réalisation de massifs renforcés par géotextiles (ou autres matériaux) nécessite le plus souvent l'utilisation de remblais techniques possédant des caractéristiques spécifiques (angle de frottement, cohésion, etc.).

Afin de limiter les entrées d'eau dans ce remblai, car elles peuvent diminuer nettement ses caractéristiques, la mise en œuvre d'un géotextile de drainage en face amont (Fig. 40 et Fig. 41) est souvent préconisée.

Le dimensionnement de ce géocomposite dépend de la géométrie du remblai et des arrivées d'eau estimées ou mesurées.

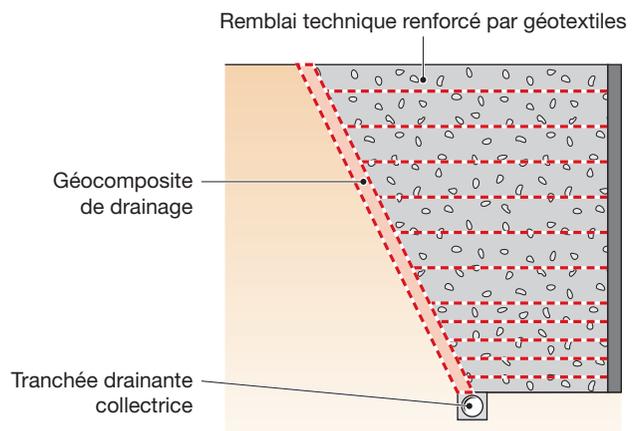


Figure 40. Profil type de position du géocomposite de drainage en talus renforcé : principe.



Figure 41. Profil type de position du géocomposite de drainage en talus renforcé (© Géoroute).

4. BÂTIMENT

Les principales applications des géosynthétiques dans le domaine du bâtiment depuis plusieurs décennies sont :

- le drainage eau/gaz sous dalle ;
- le drainage (et/ou étanchéité) vertical(e) des parties enterrées ;
- le drainage des couvertures (toiture, parvis, etc.).

Pour la plupart des applications présentées ci-après, il existe des avis techniques ou documents techniques d'application pour le bon fonctionnement de ces produits.

4.1. Drainage horizontal sous dalle béton

Lorsque la partie basse d'un bâtiment peut être au contact avec des remontées d'eau (nappe phréatique, sources, etc.), il y a des risques de mise en sous-pression hydraulique de la dalle basse, celle-ci pouvant entraîner des désordres (fissurations, rupture de dalle, etc.) rendant impossible l'utilisation du sous-sol.

Le géosynthétique utilisé doit comporter une partie drainante suffisamment performante selon le chantier, associée à un filtre non tissé en partie inférieure, et éventuellement à un géofilm en partie supérieure, pour le protéger de la laitance du béton frais coulé en place (Fig. 42).

Ce géosynthétique est dimensionné pour évacuer le flux d'eaux arrivant (directement lié à la perméabilité des sols sous-jacents), tout en limitant les sous-pressions hydrostatiques à des valeurs minimales.

Ces eaux sont alors collectées par des tranchées drainantes réparties de façon uniforme sur la totalité de la surface à drainer, et dirigées vers une fosse de relevage (Fig. 43).

Si l'évacuation vers le réseau de la ville n'est pas autorisée, il est possible de mettre en place des cheminées de décompression dans le dallage, rendant alors le sous-sol inondable périodiquement.



Figure 42. Installation d'un drainage sous dalle (© Géoroute).

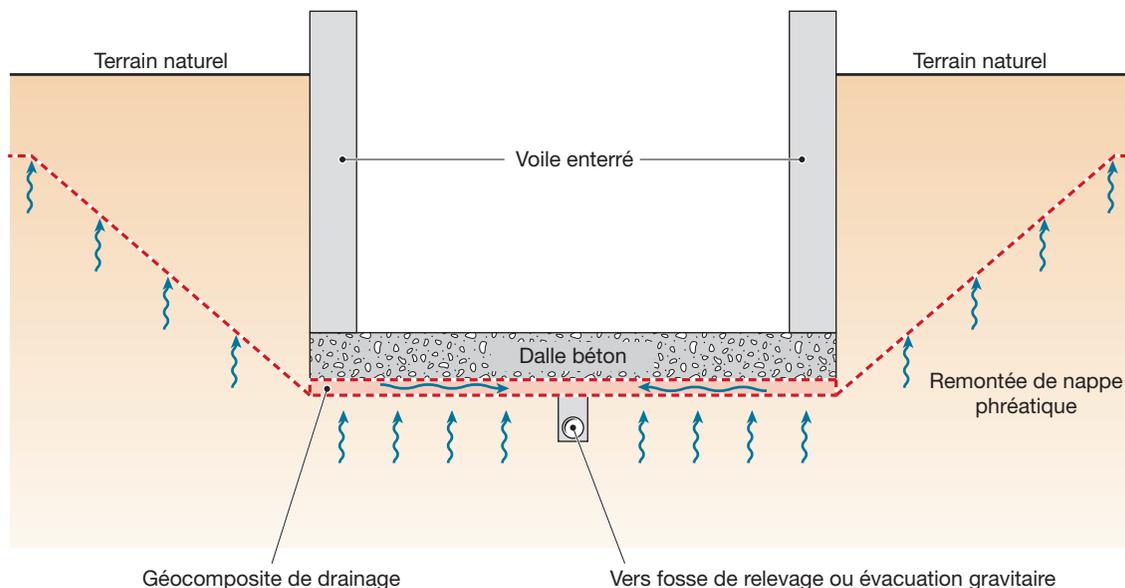


Figure 43. Principe du drainage sous dalle.

4.2. Drainage et étanchéité ou imperméabilisation des parois enterrées

Les parois enterrées des bâtiments peuvent être sensibles aux arrivées d'eaux, notamment météoriques, avec infiltrations au contact des voiles béton ou des maçonneries (Fig. 44).

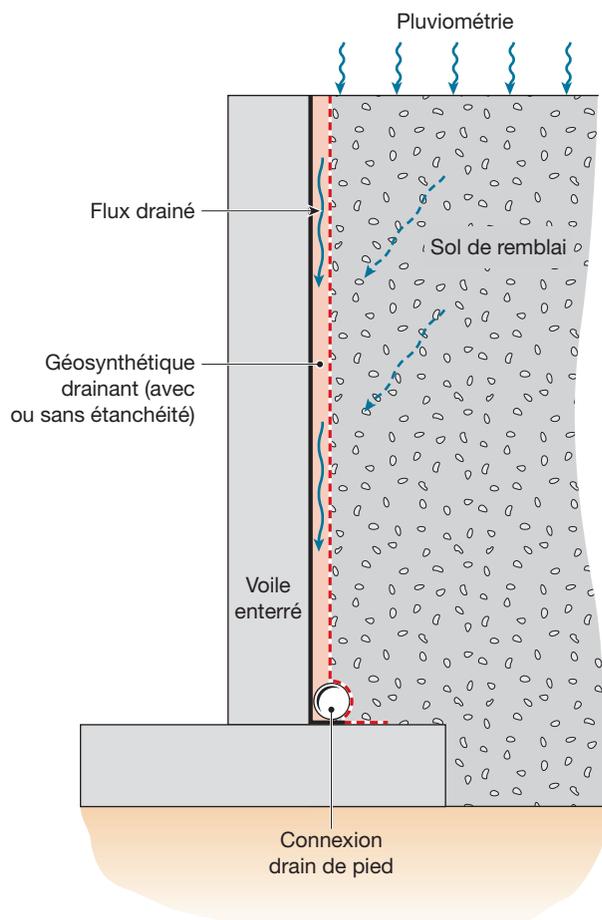


Figure 44. Drainage et/ou étanchéité par géosynthétiques.

Selon le DTU 20.1 [33], les parois enterrées sont classées en trois catégories :

- **catégorie 1** : aucune trace d'humidité n'est acceptée sur les faces intérieures des parois enterrées (locaux habitables par exemple) ;
- **catégorie 2** : des infiltrations d'eau limitées sont acceptées par le maître d'œuvre (parkings par exemple) ;
- **catégorie 3** : la paroi enterrée n'a qu'une fonction de résistance mécanique, les infiltrations d'eau sont autorisées (vide sanitaire par exemple).

La nature du matériau assurant l'étanchéité sera fonction de la catégorie retenue pour les parois enterrées. On y adjoindra un drainage.

L'étanchéité des parois enterrées se fait traditionnellement par un revêtement bitumineux spécifique, associé à un géocomposite drainant, filtrant, et assurant une protection mécanique de l'étanchéité (Fig. 45). Le concepteur doit se référer à un avis technique (AT) ou à un document technique d'application (DTA).



Figure 45. Étanchéité et drainage sur voile en béton banché ou maçonnerie (© Géoroute).

La mise en œuvre du remblai doit se faire par couches régulières compactées selon les règles de l'art [34].

On peut également mettre en œuvre :

- un géocomposite associant les trois fonctions nécessaires (étanchéité – drainage – protection mécanique de la partie étanche) ;
- une étanchéité par membrane ;
- un drainage et une protection mécanique par géotextile non tissé.

Les capacités hydrauliques de la partie drainante sont fonction de la hauteur à drainer et des venues d'eaux météoriques attendues.

Pour les chantiers où il y a des problèmes d'emprise (particulièrement les chantiers en site urbain), les parois enterrées peuvent être réalisées en voiles par passes (berlinoise, parisienne, etc.).

Ces parois réalisées, la plupart du temps par passes avec béton projeté (Fig. 46), peuvent également être drainées sur la face amont par un géocomposite de drainage.



Figure 46. Drainage derrière des voiles par passes avec béton projeté.

4.3. Confinement des gaz sur sites pollués

De plus en plus de constructions sont réalisées sur d'anciens sites industriels ou sensibles, présentant des risques toxiques vis-à-vis des occupants à venir.

On peut en particulier y trouver des produits chimiques ou des hydrocarbures infiltrés dans les sols qui provoquent des émissions de gaz pouvant être très nocives selon le type d'utilisation du bâtiment à construire.

La solution radicale, pour s'affranchir de tout risque, consiste en une purge totale des matériaux pollués et en une évacuation en installation de traitement dédiée. Diverses techniques de dépollution sont également applicables, *in situ* notamment.

Pour des raisons techniques (épaisseur de matériaux à purger incertaine) ou des raisons économiques, ces solutions de purge ne sont pas toujours applicables.

L'établissement d'une évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) permet de classer les risques toxiques selon les natures et les concentrations de gaz, et selon l'utilisation future prévue du bâtiment.

La solution de confinement/drainage du sol pollué peut aussi être envisagée (Fig. 47).

Cette solution consiste à laisser en place tout ou partie des matériaux pollués (à valider selon l'EQRS, mais en aucun cas des pollutions concentrées ne pourront être laissées en place).

Les émanations gazeuses doivent être drainées simultanément par un géocomposite et l'étanchéité améliorée avec une géomembrane posée et soudée sur la totalité de la surface concernée.

Le géocomposite de drainage doit être dimensionné pour reprendre la totalité des gaz et les évacuer vers des cheminées de dégazage ou une unité de traitement.

Ces cheminées doivent permettre de remonter ces gaz au sommet du bâtiment une fois la construction achevée pour éviter tout contact avec la population.

L'épaisseur et la nature de la géomembrane (PEHD, PP-f, etc.) sont spécifiques à chaque chantier selon, notamment, la nature des gaz à confiner.

Un géotextile anti-poinçonnant doit être placé sur la géomembrane pour la protéger lors de la réalisation de la dalle en béton armé.

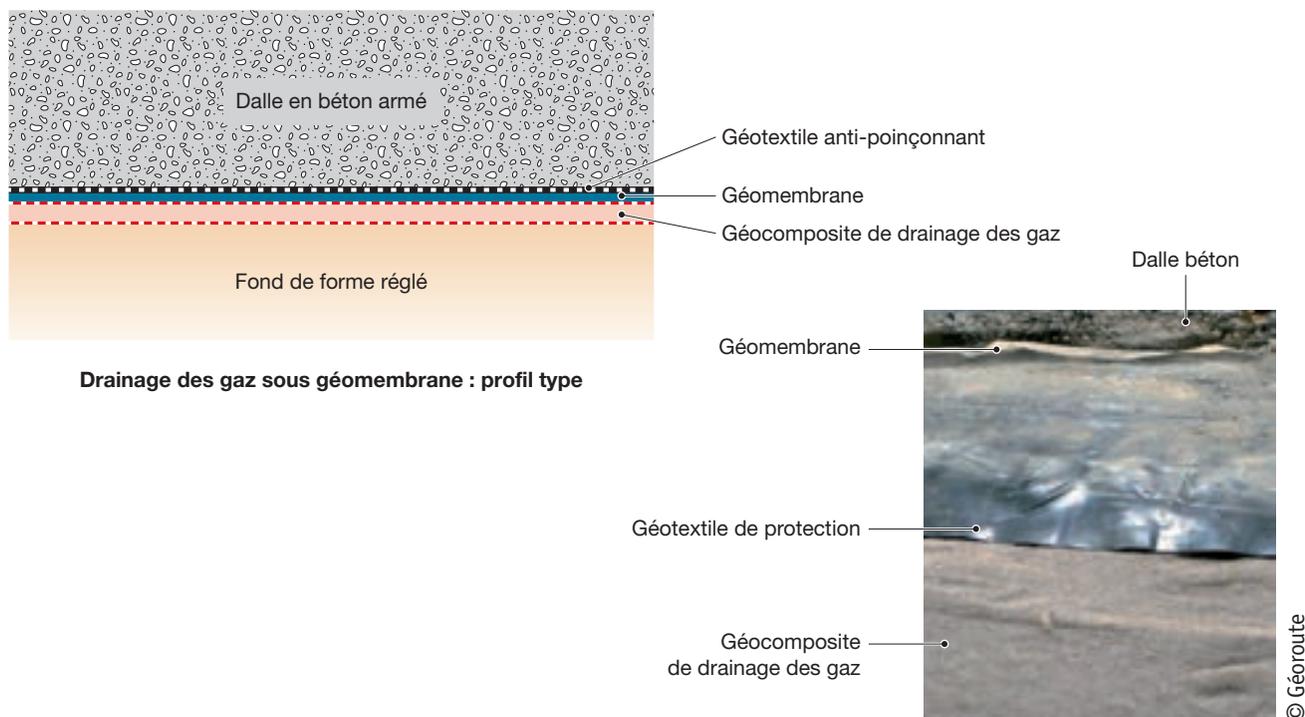


Figure 47. Confinement et drainage de gaz sous dalle.

4.4. Protection contre les aléas de retrait – Gonflement des argiles

Les périodes de forte sécheresse peuvent entraîner des variations de teneur en eau importantes. Si les fondations de l'habitat individuel reposent sur des argiles sujettes à l'absorption de par leur argilosité, il y a des risques de retrait conduisant à des déstabilisations locales des fondations. Cela se traduit par des fissurations plus ou moins importantes des voiles pouvant conduire à la ruine de l'habitat individuel (Fig. 48).

Suite à la sécheresse de 2003, le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durable a édité un guide de préconisations [35] afin de s'affranchir de ce phénomène d'aléas de retrait et gonflement des argiles, tant au niveau construction qu'au niveau réparation.

Une de ces préconisations consiste en la mise en œuvre d'une barrière imperméable sur le pourtour de l'habitat individuel et sur une largeur minimale de 1,50 m, afin de protéger la périphérie de l'évaporation, et d'éloigner les eaux de ruissellement des fondations (Fig. 49).

Cette barrière peut être réalisée grâce à une géomembrane associée, ou non, à un géotextile non tissé assurant la fonction protection.

Les eaux de précipitation bloquées par cette barrière sont récupérées par un drain collecteur en périphérie.



Figure 48. Fissure due à des gonflements d'argile (© Géoroute).

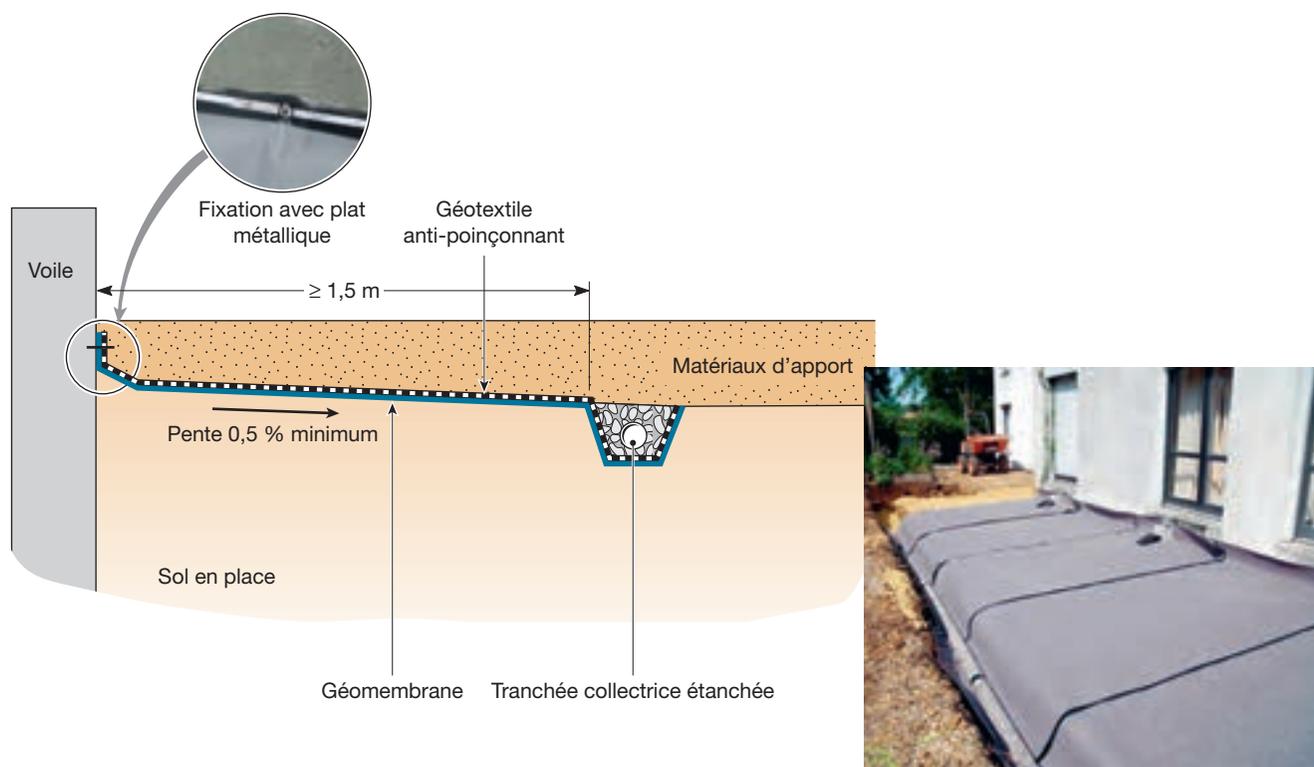


Figure 49. Barrière imperméable par géomembrane et géotextile anti-poinçonnant.

4.5. Drainage en toitures-terrasses et parvis

En toiture-terrace de bâtiment, pour éviter tout risque d'infiltration d'eau en partie inférieure, la dalle supérieure est dotée d'un système d'étanchéité recouvert d'un dispositif drainant adapté.

L'utilisation de géocomposites permet la protection mécanique (vis-à-vis de l'étanchéité) et le drainage des eaux de précipitation (Fig. 50).

Le géocomposite comporte une partie drainante, résistante au poinçonnement afin d'assurer la protection de l'étanchéité. Il comporte également une partie filtrante évitant la migration des particules fines provenant du matériau de confinement (terres, graviers, etc.).

La partie drainante doit être dimensionnée afin de permettre l'évacuation de la totalité des eaux de précipitation, en tenant compte de la géométrie de la surface toiture-terrace et des contraintes appliquées.

La partie filtrante doit avoir une ouverture de filtration adaptée à la granulométrie des matériaux de confinement.

La faible masse surfacique de ces géocomposites, comparativement aux solutions traditionnelles en matériaux granulaires, permet de limiter les contraintes apportées sur la dalle supérieure de façon importante.



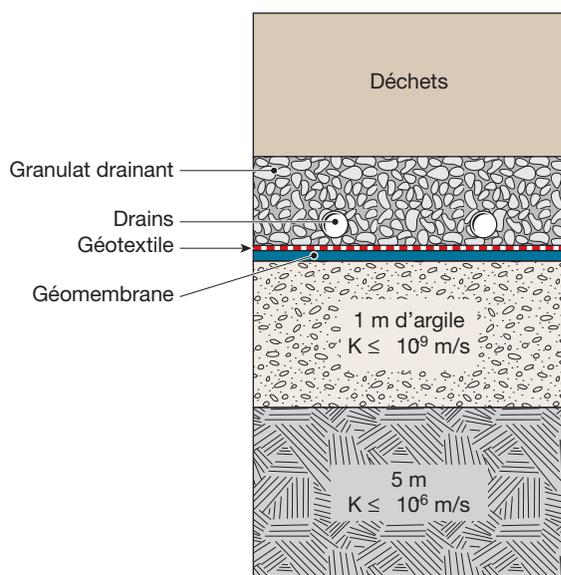
Figure 50. Couverture de l'A14 : réalisation d'un parvis piétonnier sur tranchée couverte.

5. OUVRAGES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les applications regroupées sous le terme d'ouvrages pour la protection de l'environnement incluent l'usage le plus traditionnel des géosynthétiques en étanchéité et en drainage. On y trouve :

- les fonds et couvertures d'installations de stockage de déchets ;
- les stockages de déchets liquides ;
- le confinement des liquides et gaz dans le stockage de résidus miniers ;
- l'essorage de boues.

Certaines infrastructures linéaires sont également concernées, comme les déviations réalisées sur des nappes phréatiques, les fossés, les bassins d'assainissement routiers par exemple. On présente pour les installations de stockage de déchets non dangereux, ainsi que pour les sites et sols pollués, les différentes fonctions remplies par les géosynthétiques.



K : conductivité hydraulique

5.1. Installations de stockage de déchets

5.1.1. Différentes utilisations

Les géosynthétiques sont massivement utilisés dans les installations de stockage de déchets, à la fois pour les barrières d'étanchéité – drainage de fond et flancs – mais également en couverture. Parmi les géosynthétiques utilisés, on retrouve les géomembranes et les géosynthétiques bentonitiques destinés à assurer la fonction étanchéité, les géotextiles, géoespaces, géogrilles et géoconteneurs qui ont été présentés dans le chapitre 1 de ce document.

Sur la figure 51, on répertorie quelques applications des géosynthétiques en fond et en couverture d'installations de stockage de déchets (ISD).

L'utilisation des géosynthétiques, aussi bien pour les barrières de fond et flancs que pour les barrières de couverture, doit être réalisée dans le respect de la réglementation française. Celle-ci est exposée dans l'arrêté du 9 septembre 1997 [36] modifié par l'arrêté du 31 décembre 2001 [37], l'arrêté du 3 avril 2002 [38] et l'arrêté du 19 janvier 2006 [39] relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés. Dans le cas des déchets industriels, les installations sont réglementées par l'arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux [40].

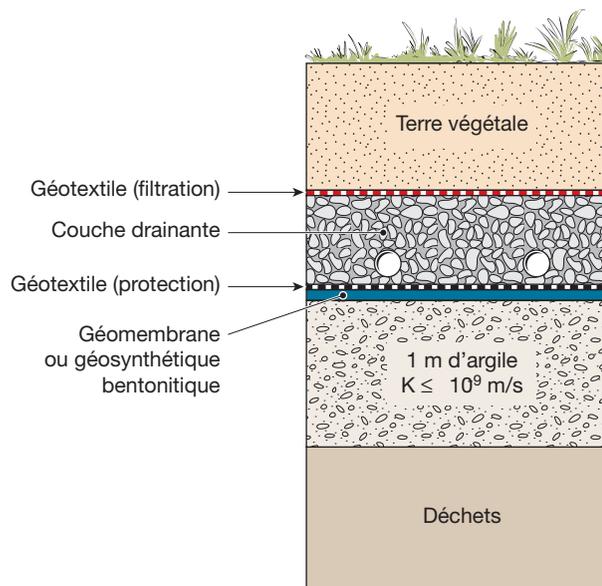


Figure 51. Exemples d'utilisations des géosynthétiques en fond et en couverture d'installations de stockage de déchets.

5.1.2. Barrière de fond et flancs

La réglementation impose que les dispositifs d'étanchéité de fond d'installations de stockage de déchets soient formés d'une barrière de sécurité passive surmontée d'une barrière de sécurité active.

La barrière de sécurité passive est normalement constituée par le sol du site. La barrière de sécurité active comprend une géomembrane surmontée d'une couche drainante qui assure le drainage et la collecte des lixiviats, qui sont les liquides percolant à travers les déchets, et évite ainsi la sollicitation hydraulique de l'argile.

5.1.3. Barrière de couverture

En couverture, le recours à des géosynthétiques est également possible. On ne recherchera pas nécessairement une étanchéité aussi complète qu'en fond et sur les flancs. Ainsi, on pourra utiliser une couverture semi-perméable qui permet une humidification limitée du déchet et facilite ainsi sa dégradation.

Une couverture imperméable est indispensable dans le cas d'une installation de stockage de déchets en mode bioréacteur où la dégradation des déchets est facilitée par l'apport de lixiviats recirculés, c'est-à-dire pompés en fond de la couche drainante et réintroduits dans le massif de déchets. La couverture imperméable par géomembrane facilite la collecte du biogaz, ce dernier pouvant être valorisé.

Le drainage, aussi bien des gaz issus de la dégradation des déchets que des eaux météoriques sur la couverture, doit être assuré. Cette fonction peut être réalisée par des géosynthétiques.

Des géosynthétiques anti-érosion permettent d'assurer la stabilité du sol de couverture à la surface des géosynthétiques. Une installation de stockage de déchets est un ouvrage dans lequel la fonction anti-érosion prend tout son sens.

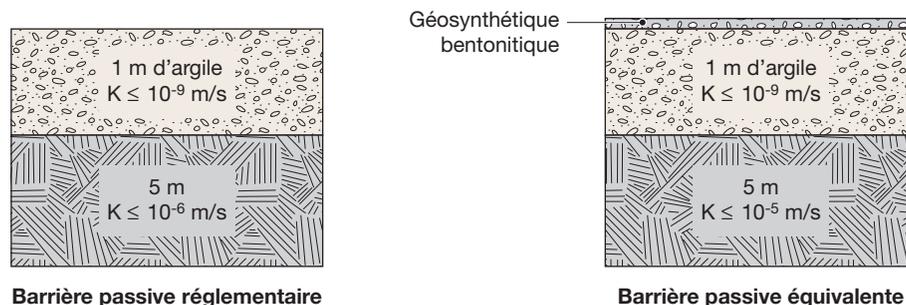
Le fascicule du CFG « Géosynthétiques et érosion », de 2003 [41], propose une méthodologie ainsi que des outils pour mettre en œuvre une stratégie de lutte contre l'érosion intégrant des géosynthétiques.

5.1.4. Notion d'équivalence pour la barrière de sécurité passive

Lorsque la conductivité hydraulique du sol du site ne répond pas aux exigences réglementaires mentionnées précédemment, des mesures compensatrices peuvent être proposées pour assurer un niveau de protection équivalent.

Deux barrières de sécurité passive sont considérées comme étant équivalentes lorsqu'elles assurent un même niveau de protection en termes d'impact potentiel du site de stockage sur une ressource en eau souterraine [42]. Parmi les mesures compensatoires proposées relativement à la constitution de la barrière de sécurité passive, le recours à un géosynthétique bentonitique (GSB) est une solution courante.

Ainsi sur l'exemple de la figure 52, la couche de sol, de 5 m d'épaisseur située sous le mètre d'argile, présente une conductivité hydraulique supérieure à celle requise par la réglementation. La barrière passive est alors renforcée par un géosynthétique bentonitique.



K : conductivité hydraulique

Figure 52. Barrière passive réglementaire et exemple de barrière équivalente.

5.1.5. Notion d'équivalence pour la couche drainante

D'après la réglementation, le drainage en fond d'installation de stockage de déchets doit être assuré par une couche drainante granulaire de 0,5 m d'épaisseur.

Il est encore exceptionnel d'avoir recours à des géocomposites drainants pour assurer le drainage des lixiviats en fond d'installation de stockage de déchets. Les enjeux ne sont pourtant pas négligeables, en particulier en termes d'allègement de la pression sur les ressources alluvionnaires, de réduction d'empreinte écologique et de vide de fouille. Les auteurs, Mandel, Gisbert et Oberti,

proposent le dimensionnement d'un géocomposite drainant destiné à se substituer à 0,2 m de granulat drainant [43]. Si l'équivalence hydraulique peut être obtenue, il faudra s'interroger sur son maintien dans le temps, en tenant compte de l'écrasement du géocomposite drainant et son éventuel colmatage biologique.

Un autre point d'interrogation réside dans le risque d'endommagement de la géomembrane par le géocomposite. Ces différents points de vigilance sont à étudier avant d'envisager une substitution.

L'exemple économique du talus renforcé de Lapouyade

Un article dans « Le Moniteur » du 21 mars 2014 présentait le cas du talus renforcé par géosynthétiques dans l'installation de stockage de déchets de Lapouyade (Veolia) (Fig. 53).

Pour rappel, le casier de stockage de déchets, réalisé en déblais, avec des pentes à 3 horizontalement (H) pour 2 verticalement (V) (3H/2V) dans des matériaux marneux doit être équipé d'un système de pompage afin de relever les lixiviats. L'aménagement initial devait être réalisé à l'angle le plus bas du casier derrière les crêtes de talus. Afin de réaliser cet aménagement, des travaux de forage et de micro-tunnelier étaient envisagés.

Néanmoins, c'est une solution de remblais à l'intérieur du casier qui a été choisie, avec installation à l'avancement des puits de pompage. Cette solution, malgré les pertes d'exploitation dues à l'emprise du remblai à l'intérieur du casier, était largement plus économique et permettait de compenser le manque à gagner. La perte de vide de fouille a même été limitée en raidissant le talus au niveau du puits de pompage à 1H/1V.



Figure 53. Photographie du talus raidi dans le casier de stockage de déchets de Lapouyade (© F. Roussy).

Les ingénieurs savent-ils estimer le gain économique lié à l'utilisation des géosynthétiques ?

Les ingénieurs parlent aux financiers ! Dans le cas de l'installation de stockage de déchets (ISD) de Saint-Brès (Sita-Sud), l'estimation du temps de retour de l'investissement (TRI) a été l'élément clé, déclenchant l'installation d'une couverture géosynthétique destinée à limiter la production de lixiviats et les dépenses associées à leur traitement (Fig. 54 et Fig. 55).

Dix ans après, malgré les aléas du chantier et quelques coûts imprévus, la solution retenue s'avère meilleure que l'hypothèse la plus optimiste imaginée en 2004 :

- gain attendu supérieur à la prévision, soit 200 à 300 k€ par an, comme indiqué dans le tableau 3 ;
- production annuelle de lixiviats divisée par 5, comme indiqué par la figure 56 ;
- TRI réel \approx TRI estimé, soit environ 5 ans.

L'étude réalisée [44] confirme la pertinence de ce type d'approche pour décider ou non d'un investissement.



Figure 54. Installation des géosynthétiques sur le talus (© Arcadis).

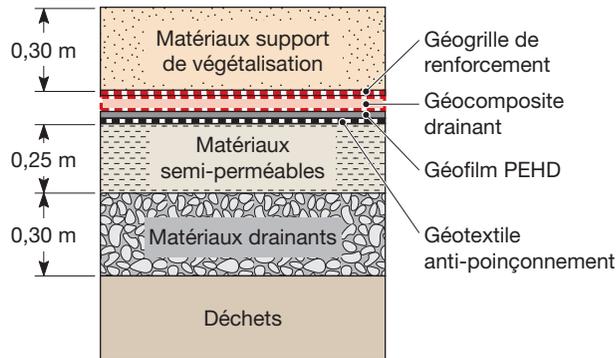


Figure 55. Schéma en coupe de la structure de la couverture.

Tableau 3 : Gain économique lié à l'utilisation des géosynthétiques [44]

	2008	2009	2010	2011	2012
G : volume de lixiviats non collectés (m ³)	6 990	15 070	12 180	12 540	12 670
Diminution du coût de traitement des lixiviats (35 €/m ³)	245 k€	527 k€	426 k€	439 k€	443 k€

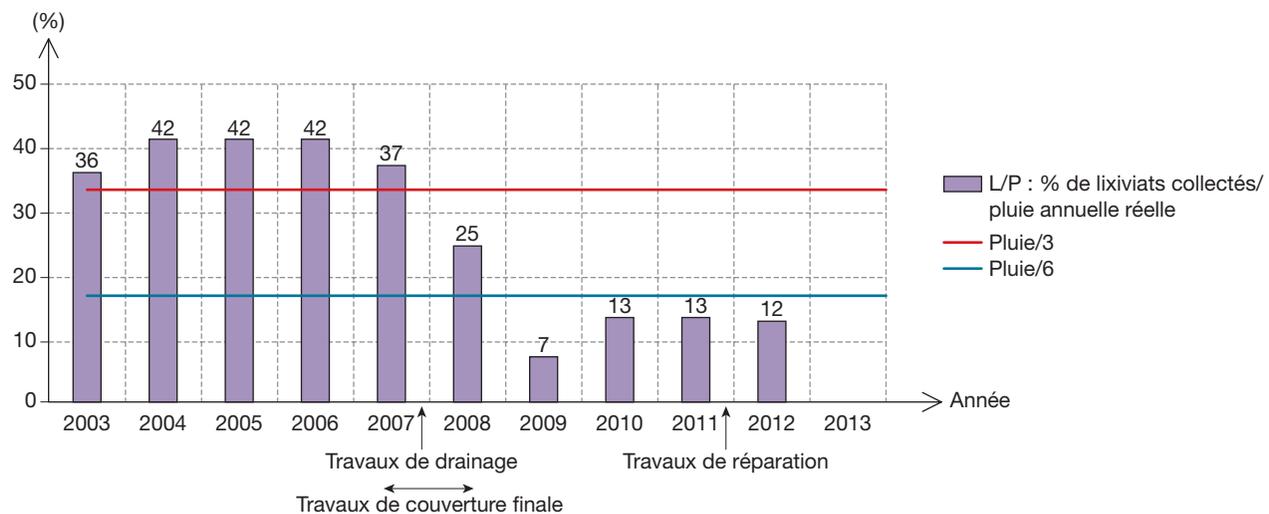


Figure 56. Évolution annuelle de la production de lixiviats de l'ISD de Saint-Brès.

5.2. Dépollution des sites et sols pollués (SSP)

5.2.1. SSP en France

Quelle que soit sa nature, la pollution d'un site résulte toujours de la défaillance d'une activité industrielle ou d'un accident de transport de produits polluants.

Les sites et sols pollués (SSP) résultent donc de ces systèmes « dégradés » et la gestion des polluants dans un contexte de fonctionnement industriel habituel (ou de routine) n'est pas considérée ici.

Les SSP existent principalement depuis la fin du XIX^e siècle mais il n'est pas rare d'avoir à intervenir, aujourd'hui, sur des pollutions dont la genèse est centenaire, voire plus ancienne dans le cas d'activités minières, par exemple, dont certaines remontent à la période romaine.

Les polluants concernés sont aussi variés que les procédés qui les ont générés. Hydrocarbures, métaux et solvants chlorés constituent néanmoins les principales familles rencontrées.

5.2.2. SSP dans la réglementation française

La prise en compte réelle de la problématique des SSP en France a commencé dans les années 1980. Le contexte réglementaire s'est étoffé dès le début des années 1990 (Loi « Barnier » en 1995) [45].

Plus récemment, la conformité aux principes du développement durable (mais aussi le manque de moyens financiers face au nombre croissant de sites recensés ou découverts !) s'est traduit par une évolution des pratiques.

En 2008, les sites et sols pollués sont pris en compte par la loi « Grenelle 1 » [46] et leur traitement est identifié comme un des points importants dans le plan de relance de l'économie.

5.2.3. Impact

L'acceptabilité d'un impact dépend de l'usage que l'on veut (ou que l'on peut) maintenir ou préserver. À titre d'exemple, pour les eaux, les usages peuvent être : eaux potables, potabilisables, industrielles, etc.

On considère aujourd'hui qu'un impact existe là où les usages des milieux sont compromis, notamment au regard des critères sanitaires. Les études de risques sont donc le préalable nécessaire à toute décision de dépollution réfléchie.

La gestion des risques suivant l'usage du site permet donc dans certains cas de laisser des produits pollués en place, à condition d'en garder la mémoire (cf. 4.3). Pour autant, les sources de pollution les plus concentrées doivent être traitées et les voies de transfert maîtrisées.

Polluer des milieux ou laisser des milieux pollués n'est pas admissible : il existe une panoplie de techniques éprouvées qui permettent de dépolluer. Elles sont classées en trois grandes catégories : les techniques « hors site », « sur site » ou *in situ*.

5.2.4. Fonction clé des géosynthétiques pour les SSP : l'étanchéité

Les sols pollués ne sont généralement pas considérés comme des déchets, notamment lorsqu'ils restent sur le site de leur genèse.

Pourtant, les solutions utilisant des géosynthétiques appliquées au traitement des SSP ont été, dans un premier temps, transposées à partir de celles développées pour la gestion des déchets. L'expérience grandissant, elles ont été adaptées ou développées pour le contexte spécifique des SSP.

Les premiers chantiers de dépollution français remontent à la fin des années 1980. L'utilisation des géosynthétiques y est rapportée depuis 1997, dans les « Rencontres Géosynthétiques » du CFG.

5.2.5. Traitement hors site

Peu de cas publiés présentent l'utilisation de géosynthétiques pour le traitement de sols pollués hors site [47].

5.2.6. Confinement hors site

Dans la majorité des cas où des sols pollués sont excavés ou dragués, puis évacués, ils sont considérés comme des déchets, au sens réglementaire. Ils sont, dès lors, éliminés dans des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), notamment en installations de stockage de déchets.

Une des rares exceptions concerne le « Grand terril de chrome » de Wattrelos (59) (Fig. 57). Des résidus de traitement de minerai de chrome VI, qui avaient été utilisés en remblais routiers, y ont été « rapportés » contre un terril préexistant, en raison de désordres observés sur les remblais. Il s'agit là, en pratique, d'une installation de stockage de déchets dangereux, qui n'est pas, réglementairement, répertoriée en tant que telle.



Figure 57. Annexe du « Grand terril de chrome » de Wattrelos : confinement « hors site » par géomembrane bitumineuse (© M. Ballie) [47].

La conception des biotertres (ou « biopiles ») est peu décrite dans la littérature. Il s'agit d'ouvrages destinés à recevoir temporairement des andains de terres polluées (constructions en tas utilisées dans le traitement de déchets), généralement par des hydrocarbures légers, afin de les aérer et de permettre la dégradation des polluants par les bactéries aérobies du sol (Fig. 58).

La durée de vie limitée de ces ouvrages (quelques mois ou années) n'a probablement pas incité leurs concepteurs à publier. De fait, la fonction « étanchéité » y est moins critique.



Figure 58. Fond et couverture de biotertres exposés aux intempéries : géofilm en polyéthylène (© Arcadis).

Pourtant, les biotertres comportent souvent des géomembranes ou des géofilms, ainsi que des géotextiles. Leur conception peut s'avérer délicate : des drains et des tuyaux traversent souvent le dispositif de couverture pour favoriser la circulation de l'air. En effet, l'objectif recherché (la dégradation des polluants, le plus souvent des hydrocarbures) requiert, dans ce cas, de l'oxygène.

5.2.7. Confinement sur site

Les chantiers de confinement sur site représentent près de la moitié des chantiers de dépollution ayant fait l'objet de publications entre 1986 et 2008.

Le confinement sur site est retenu lorsque le produit pollué peut être laissé dans l'emprise du terrain concerné, mais doit être déplacé, pour des raisons :

- de technologie disponible : une charge polluante trop importante ou un traitement *in situ* inadapté ;
- de temps disponible : le confinement est une des solutions les plus rapides ;
- d'usage futur du site : la gestion du risque requiert d'enlever et d'isoler tout ou partie des matériaux.

Les polluants concernés, métalliques dans 50 % des cas, proviennent d'industries chimiques ou minières : Cr VI, résidus acides de pyrite, résidus arséniés, Mn, etc. Les cyanures, les hydrocarbures (incluant les déchets des marées noires), le benzène, les polychlorobiphényles (PCB), les phtalates ou même les sels font aussi partie des substances confinées.

L'étanchéité est la fonction principale recherchée et les techniques sont issues de l'expérience acquise dans le stockage de déchets puisqu'il s'agit :

- soit de créer une sorte de casier de stockage, généralement appelé « confinement sur site » ;
- soit de mettre en œuvre une couverture sur les matériaux pollués, pour les isoler des eaux de pluie.

La durée de vie à atteindre est très longue (en dehors des rares cas rapportés d'usage temporaire ou préventif) puisque, le plus souvent, les produits confinés, peu évolutifs, gardent leur potentiel de dangerosité sur le long terme (Fig. 59).



Figure 59. « Tombeau d'arsenic » étanché par géomembrane PEHD en 1997 (© Antea) [48].

5.2.8. Chantiers in situ

Les traitements *in situ* ne sont pas toujours possibles. Ils consistent à traiter les impacts sur les milieux, tout en laissant les matériaux pollués en place (terrassements restreints). Respectueux des principes du développement durable, ils limitent généralement la consommation d'énergie et les transports de matériaux. On distingue deux familles de chantiers *in situ* : confinements et traitements.

5.2.8.1. Confinement *in situ*

Parois et couvertures étanches peuvent être réalisées *in situ*, les matériaux pollués n'étant modifiés ni chimiquement ni physiquement.

Dans ce concept, les géosynthétiques constituent un élément clé dans la performance du dispositif et la fonction étanchéité est souvent la seule qui permette la limitation des transferts de polluants et des impacts sur le long terme (Fig. 60).

Choisies en raison des spécificités de mise en œuvre, de la géométrie des ouvrages et des technologies disponibles, les géomembranes utilisées sont variées (PEHD, PVC, bitume).

Ces confinements *in situ* doivent, pour la plupart, perdurer sur le long terme et le retour d'expérience sur leurs performances est très satisfaisant.

Il reste que leur évolution dans le temps mérite d'être suivie avec précision, notamment si l'on considère que les géomembranes sont susceptibles d'autoriser la diffusion d'une faible fraction des polluants organiques et que des conditions de mise en œuvre délicates peuvent générer des défauts d'étanchéité.



Figure 60. Mise en œuvre d'une palfeuille PEHD dans une tranchée au coulis bentonite/ciment (© J.-L. Meusy) [49].

5.2.8.2. Traitements *in situ*

Les polluants peuvent être traités *in situ* par injection de réactifs ou de nutriments, par pompage des liquides, captage et élimination des gaz du sol, etc.

L'étanchéité est encore souvent la principale fonction recherchée des géosynthétiques mais elle est dépendante du procédé mis en œuvre : il s'agit de favoriser ou d'améliorer la performance du traitement des polluants (Fig. 61).

Dès lors, la durée de vie attendue du dispositif d'étanchéité (souvent une géomembrane) peut être plus courte et l'exigence de performance, moins critique. L'étanchéité par géosynthétiques devient un complément précieux du traitement mis en œuvre mais ne constitue plus le cœur du procédé (cf. 4.3).



Figure 61. Mise en œuvre d'une géomembrane PVC pour favoriser l'aspiration des polluants volatils sous les pelouses du Stade de France (© A. Bourrassin) [50].

5.2.9. Gestion des SSP et géosynthétiques

Toutes les fonctions élémentaires des géosynthétiques sont utiles dans la gestion des SSP et toutes les familles de produits y sont représentées.

De fait, l'apport des géosynthétiques est un élément déterminant dans la conception et la performance d'un projet de gestion des sites et sols pollués (SSP).

De nombreux transferts de technologies se sont produits à partir du savoir développé en installations de stockage de déchets, en bassins, en cuvelages ou dans le domaine minier.

Pourtant, leur rôle est souvent laissé au second plan, en raison de l'importance et de la multiplicité des autres disciplines concernées : physique, chimie, géologie, écotoxicité, etc.

La conception est trop souvent négligée au profit d'une « copie » de chantiers préexistants, ce qui peut être dommageable au fonctionnement de l'ouvrage.

De même, les contrôles de mise en œuvre sont un élément fondamental, régulièrement sous-estimé [51] : le rôle des géosynthétiques dans la gestion des SSP mériterait donc d'être davantage considéré.

À la décharge des concepteurs et des maîtres d'œuvre, les règles de l'art concernant l'utilisation des matériaux géosynthétiques dans la gestion des sites et sols pollués ne sont pas centralisées et peu, voire pas, formalisées : il s'agit clairement d'un axe d'amélioration.

6. DIMENSIONNEMENT ET PRESCRIPTIONS

6.1. Principe du dimensionnement par fonction et spécifications

Pour chaque application décrite précédemment, le géosynthétique peut faire intervenir différentes caractéristiques. Chacune d'entre elles devra être étudiée selon sa fonction dans l'ouvrage.

Ces caractéristiques peuvent ainsi être liées à :

- l'application en elle-même ;
- la mise en œuvre du géosynthétique ;
- la durabilité du géosynthétique.

L'introduction des normes européennes et des normes d'application rend caduques la plupart des normes d'essais françaises correspondant à la série NF G38-XXX. Seule la norme NF G38-019 « Détermination de la résistance au poinçonnement » est encore en vigueur.

Le tableau 4 présente la correspondance des anciennes normes françaises caduques avec les normes européennes.

Tableau 4 : Normes d'essai européennes

Caractéristique	Norme
Épaisseur	NF EN ISO 9863-1 [52]
Masse surfacique	NF EN ISO 9864 [53]
Traction/Déformation	NF EN ISO 10319 [54]
Perforation dynamique Essai par chute d'un cône	NF EN 13433 [55] Ex NF EN 918
Perméabilité normale au plan	NF EN ISO 11058 [56]
Ouverture de filtration caractéristique	NF EN ISO 12956 [57]
Capacité de débit dans le plan	NF EN ISO 12958 [58]

S'il existe encore quelques cahiers des clauses techniques particulières (CCTP) comportant des références aux normes françaises, il est demandé aux prescripteurs de porter une attention au fait que les normes ne font pas que changer de nom. Les valeurs mentionnées doivent être revues en conséquence.

Autre impact : le système de classe ne doit plus être utilisé car découlant d'une norme obsolète (la norme NF G38-040).

Ainsi, que ce soit dans un CCTP ou dans une fiche technique, il ne doit pas être indiqué, par exemple, qu'un géotextile est pour la résistance à la traction de classe 7, mais de résistance supérieure à 25 kN/m.

Enfin le dimensionnement des géosynthétiques est du domaine de l'expert.

Ainsi, la suite de ce document ne sera pas un guide de dimensionnement mais présentera les lignes directrices et aidera le maître d'ouvrage et son maître d'œuvre à comprendre les mécanismes de fonctionnement des ouvrages utilisant les géosynthétiques ainsi que les critères à prendre en compte pour le dimensionnement.

Le lecteur, désirant aller plus loin, pourra consulter les normes et/ou documents, guides et recommandations, pour chaque type d'application.

6.2. Séparation

Le dimensionnement de la fonction de séparation est principalement basé sur le retour d'expérience.

Les critères de dimensionnement pour la fonction séparation des géotextiles sont les suivants :

- l'importance du trafic sur la voie concernée ;
- la qualité du sol support (portance) ;
- l'épaisseur de matériaux d'apport au-dessus du géotextile ;
- la qualité du matériau d'apport (tout-venant, matériau granulaire...).

Les caractéristiques importantes à prescrire pour un géotextile en fonction de séparation ou anti-contaminant sont essentiellement les suivantes :

- résistance à la traction ;
- déformation à l'effort de traction maximal ;
- perforation dynamique ;
- ouverture de filtration, qui correspond à la taille des plus grosses particules de sol susceptibles de traverser le géotextile.

Remarque

- Il est important de garder à l'esprit que la masse surfacique du géotextile ne doit être considérée que comme une caractéristique à caractère informatif et non comme un critère dimensionnant.

6.3. Filtration

La fonction filtration fait l'objet d'un fascicule du CFG révisé en 2012. Ce fascicule intitulé « Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration » [59] permet de définir le rôle d'un géotextile filtrant et donne les éléments nécessaires au dimensionnement ainsi que des exemples de spécifications.

Les critères à prendre en compte pour le dimensionnement d'un filtre géotextile sont les suivants :

- la granularité du sol à filtrer (Fig. 62) ;
- la perméabilité du sol ;
- le gradient hydraulique de l'écoulement dans le sol.

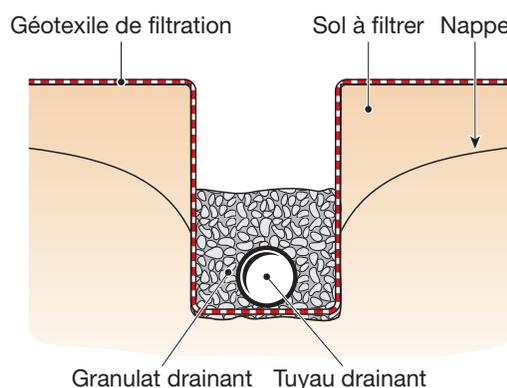


Figure 62. Exemple de géotextile de filtration en tranchée drainante.

Les caractéristiques fonctionnelles à dimensionner pour satisfaire le rôle de filtration sont :

- l'ouverture de filtration ;
- la perméabilité normale au plan (NF EN ISO 12958 [58]).

Néanmoins, un bon dimensionnement fonctionnel du géotextile filtrant n'est cependant pas suffisant. Il est nécessaire également de prendre en compte le possible endommagement du géotextile lors de la phase chantier et d'installation des matériaux d'apport (matériaux drainants d'une tranchée, enrochement...).

Les caractéristiques à prendre en compte sont alors :

- la résistance à la traction ;
- la déformation à l'effort de traction maximal ;
- la perforation dynamique.

En complément des ouvertures de filtration, la structure des géotextiles a une influence sur la rétention ou la non-rétention des particules.

Par exemple, le nombre de constriction évalué suivant la norme XP G38-030 [60] est un paramètre indicatif de la structure de certains géotextiles vis-à-vis de la fonction filtration pour leur application, notamment sous enrochement en ouvrage hydraulique.

Définition

- La notion de constriction est utilisée pour caractériser un rétrécissement délimité par les fibres composant le géotextile et qui empêche une particule de diamètre donné de circuler d'un pore à un autre. Cette caractéristique a déjà fait l'objet de nombreuses publications montrant que la rétention du sol est atteinte de manière optimale lorsque ce nombre est compris entre 25 et 40 [61].

6.4. Drainage

Les géocomposites de drainage doivent être dimensionnés pour permettre d'évacuer les fluides (eau ou gaz) selon les caractéristiques propres à chaque chantier.

L'essai de « capacité de débit dans le plan » (NF EN ISO 12958) permet de choisir le géocomposite adapté pour évacuer le flux à drainer.

Cet essai est réalisé en laboratoire par transmissivimètre (Fig. 63).

Les caractéristiques à prendre en compte pour le dimensionnement du géocomposite sont :

- la contrainte appliquée sur le géocomposite (hauteur de remblai, épaisseur de dalle béton, etc.) ;
- la longueur maximale d'écoulement jusqu'au point d'évacuation, habituellement une tranchée drainante collectrice ou des descentes d'eau ;
- la pente d'écoulement dans le géocomposite.

Pour tout drainage au contact de sols, un filtre géotextile est obligatoire.

Qu'il soit ajouté *in situ* ou associé en usine au géocomposite de drainage, celui-ci doit avoir une ouverture de filtration justifiée vis-à-vis de la granulométrie du sol à filtrer et du type d'écoulement hydraulique (cf. 6.3).



Figure 63. Transmissivimètre (© Irstea).

S'il s'agit de drainage de précipitations (toiture-terrasse, parvis, etc.), on peut se baser sur les données locales de Météo France ou de stations de pluviométrie proches du chantier.

S'il s'agit d'eaux de remontée de nappe phréatique, il faudra :

- soit réaliser des essais de perméabilité *in situ* (type Lefranc, Porchet, etc.) ;
- soit qualifier la nature des sols sous-jacents (selon les sondages réalisés) pour avoir une approche globale de la perméabilité de ces sols.

6.5. Renforcement

6.5.1. Principes généraux

Le principe général du renforcement par géosynthétiques est basé sur le frottement entre le sol et le géotextile. Il impose qu'il y ait déformation du géosynthétique afin de concentrer les efforts dans ce dernier.

Les règles de dimensionnement font appel en tout premier lieu à l'Eurocode 7 et à ses normes d'application, comme la NF P94-270. Même si les applications ne font pas encore l'objet de méthodes normalisées en France, des guides et recommandations existent et les dimensionnements peuvent s'appuyer également sur les normes anglaises (BS8006 notamment) et allemandes (EBGEO) applicables.

Généralement le dimensionnement par l'approche des états limites est applicable.

On retiendra le plus souvent les états limites suivants :

- rupture par dépassement de la résistance du géosynthétique ;
- rupture de l'ancrage par glissement du géosynthétique ;
- état limite de service, déformation admissible de l'ouvrage.

6.5.2. Résistance à la traction et coefficient de réduction

Pour les prescriptions des applications de renforcement, la raideur du géotextile (soit le rapport entre la résistance à la traction et la déformation du produit) est une caractéristique qui peut très souvent être suffisante.

Différents facteurs influent sur les caractéristiques mécaniques du géosynthétique.

Les calculs doivent prendre en compte les phénomènes suivants :

- l'endommagement du géosynthétique dû aux agressions mécaniques lors de la construction ;
- l'évolution physique du matériau sous l'effet du fluage ;
- les dégradations d'origine chimique et/ou biochimique, dues à l'environnement.

Des coefficients de réduction ont donc été définis notamment dans la norme NF P94-270 pour chacun de ces phénomènes.

Bien que la norme NF P94-270 soit applicable aux remblais renforcés, les coefficients sont généralement repris pour le dimensionnement des autres applications.

Par ailleurs, le frottement à l'interface sol-géosynthétique est une caractéristique à connaître pour l'ensemble des dimensionnements de renforcement. Il permet de déterminer par exemple les dimensions des ancrages.

Néanmoins, ces valeurs, liées aux produits et différentes selon les fabricants, ne doivent pas être considérées comme des valeurs de prescription. Ainsi, un CCTP ne devrait pas mentionner une valeur maximale de coefficient de réduction lié à l'endommagement lors de l'installation ou au fluage. Un produit ne peut donc pas être refusé par le maître d'œuvre sur la base de ces critères. Ils servent par exemple à affiner le dimensionnement en phase d'exécution.

6.6. Critères de dimensionnement

Dans ce paragraphe, les critères à prendre en compte pour le dimensionnement du géosynthétique sont présentés pour chaque application dans laquelle la fonction renforcement intervient. Par ailleurs, et afin que le géotechnicien trouve l'information dont il a besoin, les normes de dimensionnement ou guides de référence applicables sont indiqués pour chaque application.

6.6.1. Remblais renforcés par géosynthétiques

Les remblais par géosynthétiques se dimensionnent en fonction des contraintes suivantes (Fig. 64) :

- topographie du terrain ;
- géométrie du remblai (hauteur, pente...) ;
- coupe géotechnique (caractéristiques mécaniques des matériaux supports du remblai) ;
- poids volumique et angle de frottement des matériaux constituant le remblai renforcé ;
- charge d'exploitation.

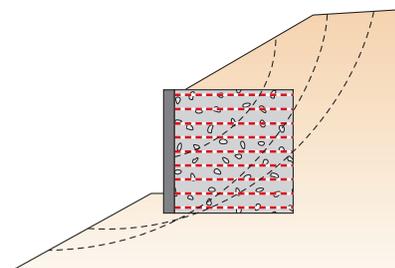


Figure 64. Exemple de surfaces de glissement potentiel [62].

Les éléments en parement sont très généralement négligés dans les calculs de stabilité.

Par ailleurs, les calculs sont le plus souvent réalisés à la rupture (Fig. 65).

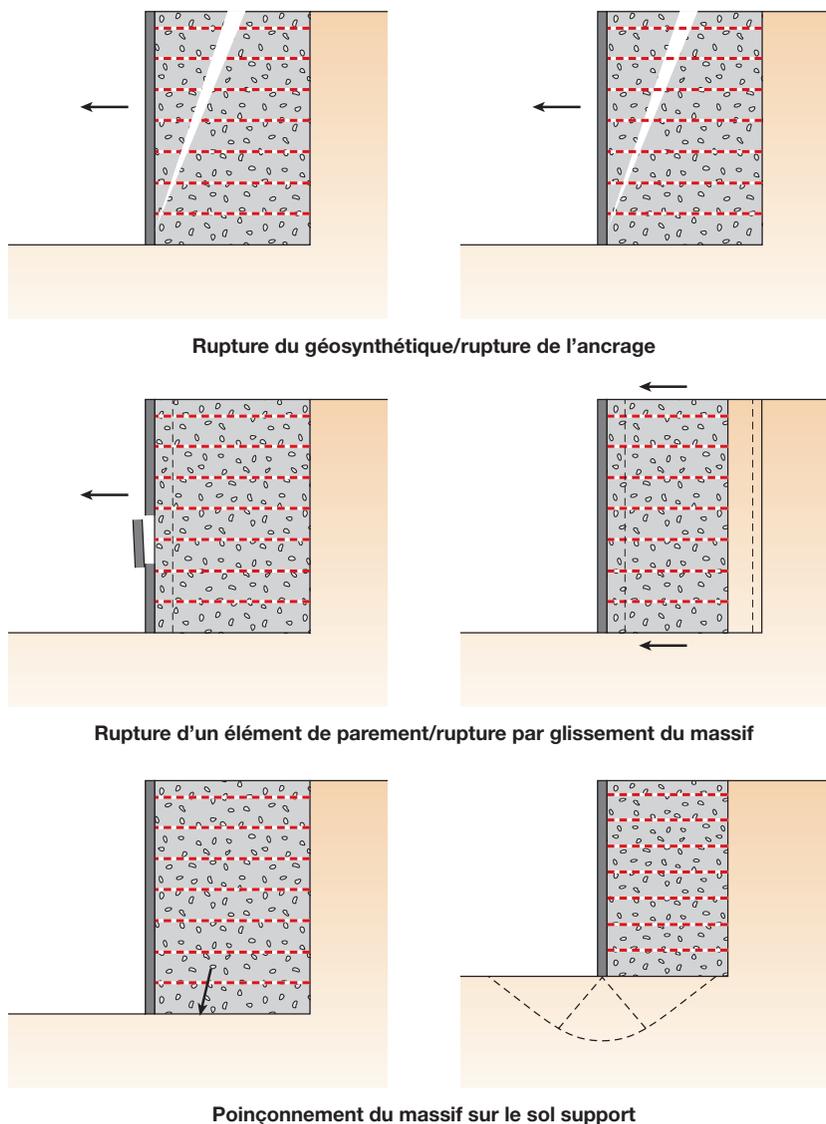


Figure 65. Autres états limites étudiés.

Des calculs et des modélisations plus complexes peuvent permettre de travailler en prenant en compte les déformations en service (Fig. 66).

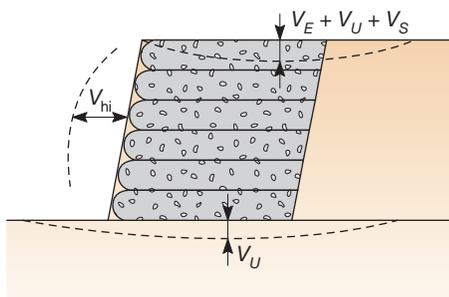


Figure 66. Déformation du parement et déformation en tête de remblai.

Pour en savoir plus :

- Eurocode 7 [62].
- NF P94-270 [63].
- XP G38-064 [64].
- NF EN 14475 [65].

6.6.2. Remblais sur sols compressibles

Le domaine des remblais sur sols compressibles ne dispose pas en France de normes de dimensionnement, hormis l'application des Eurocodes (Eurocode 7 notamment [62]).

Afin de déterminer les résistances à la traction dans le géosynthétique pour les remblais sur sols compressibles, les critères suivants sont à étudier :

- géométrie du remblai (hauteur, pente...);
- caractéristiques des matériaux de remblais;
- coupe géologique du sol support avec notamment les caractéristiques de frottement et de cohésion non drainée ainsi que l'épaisseur des couches compressibles.

La norme BS8006 de 2010 (norme anglaise) peut être une aide en attendant l'arrivée d'une norme de dimensionnement française.

Différentes stabilités aux états limites sont à étudier comme indiqué sur la figure 67.

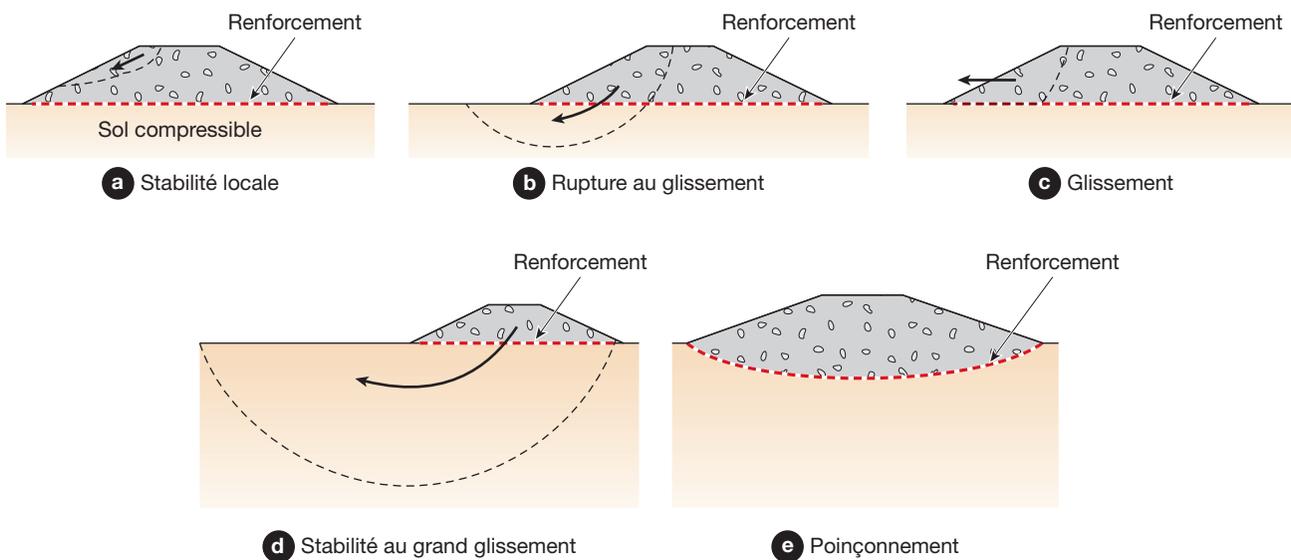
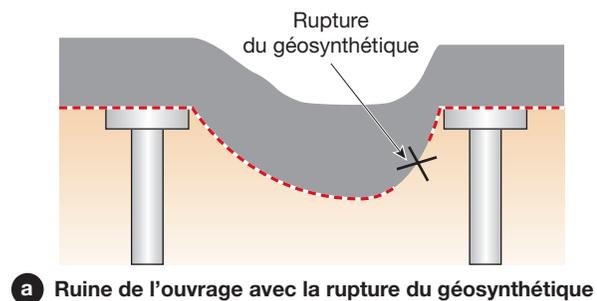


Figure 67. Mécanisme de rupture d'un remblai sur sol compressible.

6.6.3. Remblais sur inclusions rigides

Le dimensionnement du géosynthétique sur inclusions rigides se prête à l'approche des états limites définie dans l'Eurocode 7.

Les états limites sont présentés dans les différentes parties de la figure 68.



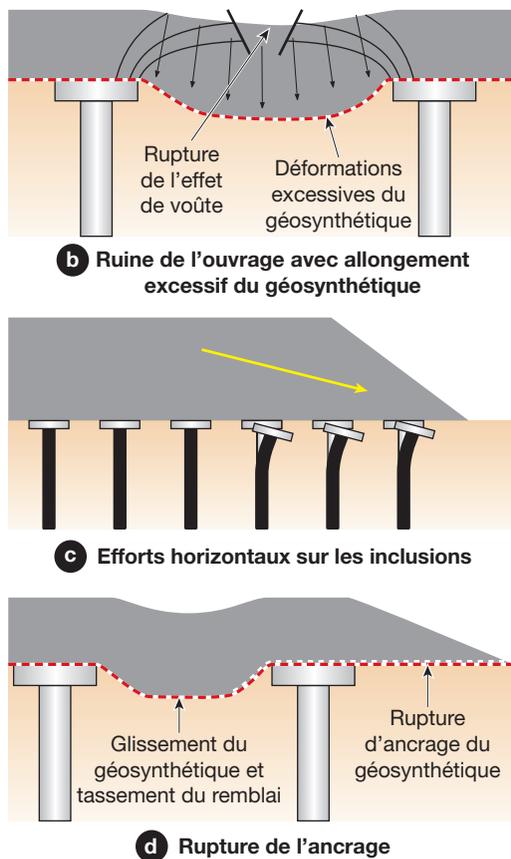


Figure 68. Remblais sur inclusions rigides : états limites.

Dans les recommandations issues du projet Asiri (cf. 3.4), plusieurs méthodes sont proposées pour calculer la répartition des contraintes dans le plan horizontal placé en tête des inclusions. Elles peuvent être utilisées pour déterminer la tension à reprendre par le géosynthétique.

D'autres méthodes peuvent être également utilisées comme celle de la norme BS8006 de 2010 ou l'EBGEO.

Les critères importants à prendre en compte pour le dimensionnement sont :

- les caractéristiques de sol support et du matelas de répartition ;
- le maillage des inclusions, mais surtout la distance entre les extrémités des têtes d'inclusions ;
- la hauteur du remblai ;
- les déformations attendues en tête.

6.6.4. Remblais sur cavités

Les critères à prendre en compte pour le dimensionnement du géosynthétique sur cavités (Fig. 69) sont :

- le diamètre de la cavité ;
- les caractéristiques des sols au-dessus et en dessous, et notamment leur angle de frottement ;
- la hauteur du remblai ;
- la déformation admissible en tête de remblai ;
- la durée de service du renforcement.

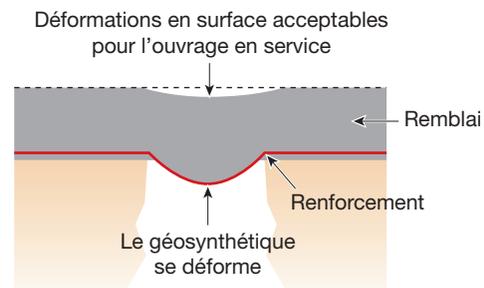


Figure 69. Principe du renforcement sur cavités.

Dans l'ensemble de la littérature sur le sujet du renforcement par géosynthétiques sur cavités (EBGEO, méthode Rafael - cf. 3.4.3 -, etc.), on remarque que le ratio hauteur de remblai (H)/diamètre de cavité (D) est un paramètre influant sur le dimensionnement. Ce rapport H/D peut être utile pour préciser les limites de l'utilisation des géosynthétiques pour le renforcement de remblais sur cavités.

Les différents retours d'expérience montrent que le renforcement par géosynthétiques peut être considéré comme adapté si les critères suivants sont respectés (Fig. 70) :

- $H/D > 0,375$;
- $H > 0,5$ m.

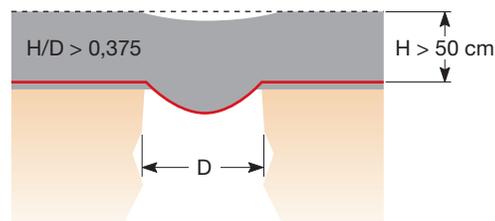


Figure 70. Critères minimaux à respecter pour un renforcement par géosynthétiques sur cavité.

Il est important de préciser que deux paramètres ont une grande influence sur le dimensionnement du produit :

- les déformations admissibles en surface ;
- le coefficient de foisonnement du sol.

Définition

- Le foisonnement est la capacité d'un sol ou de gravats à augmenter de volume lors du déplacement du matériau. Le coefficient de foisonnement est la proportion de volume supplémentaire sur le volume initial ramené à 100.

Concernant le premier, on retrouve des informations dans les normes européennes, avec des rapports de déflexion (ds)/longueur du désordre en surface (Ds) compris entre 0,2 et 5 % en fonction de la destination du traitement de surface (tracé ferroviaire, route, zone piétonne).

Le second est plus difficile à appréhender car il dépend du matériau du remblai et de son niveau de compacité initial. Comme le précisent Villard et Briançon en 2009 [66], ce coefficient peut atteindre une valeur de 1,15 pour des sols de remblais à forte

granularité, mais des valeurs de 1,03 à 1,1 sont plus appropriées pour des matériaux de remblais courants.

Les recommandations allemandes sont plus conservatives et préconisent un coefficient de 1,03 pour des matériaux granulaires roulés et de 1,05 pour des matériaux concassés.

6.7. Protection des géomembranes

La fonction protection est très complexe. Elle bénéficie pour le moment de trop peu d'études pour qu'il existe une méthode unanimement reconnue de caractérisation de l'aptitude d'un géotextile à protéger une géomembrane. Cette propriété dépend de la nature du matériau « endommageant » et de son type d'action, dynamique ou statique, mais aussi du type de géomembrane à protéger et du sol support.

Pour le dimensionnement, les approches sont variables et leur fondement est souvent empirique. Les essais les plus simples et les plus significatifs sont les essais de résistance au poinçonnement. Les principales caractéristiques mécaniques requises par le marquage CE pour la fonction protection sont :

- la résistance à la traction [54] ;
- la déformation à l'effort maximal [54] ;
- la résistance à la perforation dynamique (chute de cône) [55] ;
- l'efficacité de la protection à long terme dans le cas spécifique des installations de stockage de déchets non dangereux [67] ;
- la résistance au poinçonnement pyramidal dans le cadre des stockages de déchets liquides, des canaux et des ouvrages hydrauliques [68].

En règle générale, un géotextile de faible grammage ne peut assurer une fonction de protection, mais cette caractéristique ne doit pas être considérée comme suffisante pour cette fonction.

Compte tenu du relatif manque d'outils pour le dimensionnement, il est conseillé, pour des ouvrages où la fonction protection revêt une grande importance, de recourir à des planches d'essai sur site. Celles-ci permettront notamment d'évaluer l'efficacité du géotextile dans les conditions réelles. On testera dans ce cas, non pas le géotextile seul, mais le géotextile et la géomembrane constituant ensemble un DEG.

7. DÉMARCHE DE CERTIFICATION

Le CFG recommande l'utilisation de géosynthétiques certifiés et d'entreprises qualifiées pour leur pose. Cette démarche permettra en particulier de garantir une bonne étanchéité des soudures y compris au niveau des points singuliers.

Présentation de l'Asqual

L'Asqual est un organisme indépendant, créé par des centres techniques, auxquels se sont joints le Comité français des géosynthétiques (CFG) puis le Comité français des agrotextiles. Cette association est le partenaire privilégié des professionnels du textile, de l'habillement et des géosynthétiques. L'Asqual a contribué à la construction d'une démarche de qualité globale dans les géosynthétiques. Celle-ci s'est fortement structurée au cours des dernières années et le mouvement continue de progresser.

L'Asqual est une association qualité à but non lucratif qui a pour mission de participer à la promotion de la qualité et de la certification des produits ou des services.

Les certifications et la qualification Asqual valorisent les performances des produits et l'ensemble de la politique qualité de l'entreprise.

Les principales certifications Asqual proposées à ce jour sont :

- **la certification des géotextiles** : forte de plus de 190 certificats, la certification des géotextiles s'est récemment renouvelée avec une nouvelle présentation des caractéristiques, basées sur des méthodes d'essais européennes pour des critères certifiés suivant les fonctions retenues : filtration, séparation, drainage, renforcement, protection ;

- **la certification des géomembranes** : plus de 55 géomembranes sont aujourd'hui certifiées sur les cinq familles chimiques définies (PVC-P, PP-f, PEHD, EPDM et géomembranes bitumineuses) ;

- **la certification de services « soudage »** : on recense aujourd'hui plus de 300 certificats « soudage ». Cette certification s'est fortement développée ces dernières années et s'applique aux différentes familles chimiques de géomembranes qui ont été précédemment listées ;

- **la certification de services « responsabilité de chantier »** : plus de 80 certificats sont opérationnels ;

- **la qualification d'entreprise d'application de géomembranes** : cette qualification a pour objectif d'attester de la compétence, du professionnalisme et de la capacité d'une entreprise d'application de géomembranes à réaliser une prestation dans cette activité, en suivant les exigences générales de la norme NF X50-091 [69].

N'oubliez pas le contrôleur !

Dans un contexte économique difficile, les maîtres d'ouvrage voient leur budget réduit pour la construction d'ouvrages qu'il convient néanmoins de réaliser pour le long terme.

La mission du contrôleur extérieur est souvent la première économie visée par les coupes budgétaires, même si elle ne représente que quelques pourcents du montant total des travaux.

Pourtant, dysfonctionnements et sinistres résultent de choix techniques et de mises en œuvre inadaptés, tout à fait identifiables par un tiers expert indépendant et compétent, aux différents stades d'avancement du projet.

C'est tout l'enjeu du contrôle extérieur, indispensable pour réduire ces risques : les non-conformités d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) ont souvent des conséquences qui génèrent des travaux de reprises qui vont bien au-delà de la seule réparation des soudures.

Pour en savoir plus

- Avis d'expert du CFG (J.-F. Ouvry et L. Sauger, 2014) [51].
- Guide du CFG « Les techniques de contrôle d'étanchéité » [70].



Figure 71. Contrôles d'étanchéité.

POUR EN SAVOIR PLUS

Références bibliographiques

[1] NF EN ISO 10318 (mai 2006 – indice de classement : G38-109) : Géosynthétiques – Termes et définitions.

[2] Cahier des clauses techniques générales. Fascicule 67 – Titre III. « Étanchéité des ouvrages souterrains ». Document annexé à l'arrêté du 30 mai 2012. *Bulletin Officiel*.

[3] NF P84-500 (avril 2013 – indice de classement : P84-500) : Géomembranes – Dictionnaire des termes relatifs aux géomembranes.

[4] NF P84-700 (octobre 2008 – indice de classement : P84-700) : Géosynthétiques bentonitiques – Généralités – Définitions.

[5] XP G38-067 (juillet 2010 – indice de classement : G38-067) : Géosynthétiques – Géotextiles et produits apparentés – Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente – Justification du dimensionnement et éléments de conception.

[6] Comité français des géosynthétiques, *Recommandations générales pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets*, Fascicule 11, 1995.

[7] Comité français des géosynthétiques, *Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes*, Fascicule 10, en cours de révision à la date de rédaction de ce document.

[8] NF EN 13251 (septembre 2001 – indice de classement : G38-183) : Géotextiles et produits apparentés – Caractéristiques requises pour l'utilisation dans les travaux de terrassement, fondations et structures de soutènement.

[9] ISO TR 20432 (décembre 2007) : Lignes directrices pour la détermination de la résistance à long terme des géosynthétiques pour le renforcement des sols.

[10] NF EN 12224 (mars 2002 – indice de classement : G38-161) : Géotextiles et produits apparentés. Détermination de la résistance au vieillissement dû aux conditions climatiques.

[11] Farcas F., Touze-Foltz N., « Vers une évaluation de la durabilité des géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD) dans les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) », *Avis d'expert*, 2013 (<http://www.cfg.asso.fr/publications/avis-dexperts>).

[12] Baldauf S., Tarnowski C., Weiss B., « Long-term durability assessment: Evaluation of exposed HDPE geomembrane performance after 17 years in service in a water reservoir in Spain », *Eurogeo 5*, Valence (Espagne), 2012.

[13] Noval A., Blanco M., Farcas F., Touze-Foltz N., « Étude de la durabilité de la géomembrane en EPDM installée dans la retenue de El Boqueron », *Rencontres Géosynthétiques*, La Rochelle, 2015.

[14] Benchet R., Hérisson C., Gerbaud F., Croissant C., Grivaud S., « Étude sur la durabilité des géomembranes en bitume élastomère exposées sur site depuis 6 à 30 ans », *Rencontres Géosynthétiques*, Dijon, 2013.

[15] Touze-Foltz N., Croissant D., Farcas F., Royet P., « Quantification of oxidized bituminous geomembranes ageing through hydraulic testing », *9th International Conference on Geosynthetics*, Guaruja (Brésil) 2010.

[16] Carreira T., Tanghe, H., « Durability of PVC-P geomembranes in hydraulic structures, Proceedings », *Eurogeo 4*, Edimbourg (Écosse), 2008.

[17] Heibaum M., Fourie A., Girard H., Karunaratne G.P., Lafleur J., Palmeira, E.M. « Hydraulic applications of geosynthetics. Proce-

dings », *8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohama (Japon), 2006.

[18] Giroud J.-P., Gourc J.-P., « The first double geomembrane liner forty years later », *International Conference on Geosynthetics*, Berlin (Allemagne), 2014.

[19] Cazzuffi D., Giroud J.-P., Scuero A., Vaschetti G., « Emploi des géomembranes dans les barrages : 50 ans de différentes applications dans le monde », *Rencontres Géosynthétiques*, 2011.

[20] Faure Y.-H., Mériaux P., Verstaevael M., Bertrand C., « Vieillesse des géotextiles filtres dans les ouvrages de drainage – Auscultation du dispositif expérimental de Roissard », *Rencontres Géosynthétiques*, 2011.

[21] Giroud J.-P., Gourc J.-P., Bally P., Delmas P., « Comportement d'un textile non tissé dans un barrage en terre », *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, Session 6, Paris, 1977.

[22] Poulain D., Touze-Foltz N., Peyras L., Duquennois C. « Containment pond, reservoirs and canals », in Chapter 14, *Handbook of geosynthetic engineering*, ICE publishing, 2012.

[23] SETRA/LCPC, *Étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier*, 2000.

[24] Comité français des géosynthétiques, *Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques*, Fascicule 12, 1998.

[25] Artières O., « Système de filtration géotextile bicouches en protection de côtes », *VII^e Journées nationales Génie civil – Génie côtier*, Anglet, 2002.

[26] Artières O., Dunand M., « Corps de digue en tubes géosynthétiques à Port-Médoc – Le Verdon (33) », *Rencontres Géosynthétiques*, 2006.

[27] SETRA/LCPC, *Réalisation des remblais et des couches de forme*, 2^e édition, 2002.

[28] NF EN 15381 (décembre 2008 – indice de classement : G38-177) : Géotextiles et produits apparentés. Caractéristiques requises pour l'utilisation dans les chaussées et couches de roulement en enrobés.

[29] Transportation Research Board, *Maintenance and Operations of Transportation Facilities*, 1999.

[30] Service technique des bases aériennes, *Techniques anti-remontées des fissures – Guide d'emploi en chaussées aéronautiques*, 1999.

[31] IREX, *Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides*, 2012.

[32] Blivet J.-C., Khay M., Gourc J.-P., Giraud H., « Design considerations of geosynthetic for reinforced embankments subjected to localized subsidence », *Geosynthetics 2001*, Conférence, Portland (États-Unis), 2001.

[33] DTU 20.1 (octobre 2008 – indice de classement : P10-202) : Travaux de bâtiment. Ouvrages en maçonnerie de petits éléments. Parois et murs – Partie 1 : cahier des clauses techniques.

[34] DTU 12 : Terrassement pour le bâtiment – Cahier des charges, CSTB, 2002.

[35] Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durable, *Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ?*, Version 4, 2007.

[36] Arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, JO du 2 octobre 1997. *Titre de la version en vigueur* : Arrêté

du 9 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux (Code permanent environnement et nuisances).

[37] Arrêté du 31 décembre 2001 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, *JO* du 2 mars 2002.

[38] Arrêté du 3 avril 2002 modifiant l'arrêté du 31 décembre 2001 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, *JO* du 19 avril 2002.

[39] Arrêté du 19 janvier 2006 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, *JO* du 16 mars 2006.

[40] Arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux, *JO* du 16 avril 2003.

[41] Comité français des géosynthétiques, *Géosynthétiques et érosion*, 2003.

[42] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (MEEDDAT), *Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets*, Version 2, 2009.

[43] Mandel G., Gisbert T., Oberti O., « Utilisation de géosynthétiques en équivalence de drainage de lixiviats dans les installations de stockage de déchets », *Rencontres Géosynthétiques*, Nantes, 2009.

[44] Gisbert T., « Utilisation des matériaux géosynthétiques dans la gestion des Sites et Sols Pollués (SSP) : sujet clé », *Rencontres Géosynthétiques*, Nantes, 2009.

[45] Loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, *JO* du 3 février 1995.

[46] Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, *JO* du 5 août 2009 (dite « loi Grenelle 1 »).

[47] Ballie M., Studio R., Breul B., « Étanchéité de parois de terils », *Géotextiles – Géomembranes, Rencontres 99*, Bordeaux, Girard et Gourc éditeurs, tome 1, Bordeaux, 1999.

[48] De Bont R., Ouvry J.-F., « Travaux d'étanchéité de couverture d'un tombeau d'arsenic », *Géotextiles – Géomembranes, Rencontres 99*, Bordeaux, Girard et Gourc éditeurs, tome 1, Bordeaux, 1999.

[49] Meusy, J.-L., « Confinement vertical d'un site pollué par palfeuille PEHD », *Rencontres Géosynthétiques*, Nantes, 2009.

[50] Bourassin A., Fayoux D., Gisbert T., « La couverture du centre de stockage de Vert-le-Grand (Essonne) », *IV^e Rencontres Géosynthétiques*, Bordeaux, 1999.

[51] Gérard Y., Ouvry J.-F., Sauger L., « Le contrôle et ses enjeux dans les ouvrages impliquant la mise en place de matériaux géosynthétiques », *Avis d'expert*, 2014 (<http://www.cfg.asso.fr/publications/avis-dexperts>).

[52] NF EN ISO 9863-1 (février 2006 – indice de classement : G38-107-1) : Géosynthétiques – Détermination de l'épaisseur à des pressions spécifiées – Partie 1 : couches individuelles.

[53] NF EN ISO 9864 (octobre 2005 – indice de classement : G38-108) : Géosynthétiques – Méthode d'essai pour la détermination de la masse surfacique des géotextiles et produits apparentés.

[54] NF EN ISO 10319 (août 2008 – indice de classement : G38-129) : Géosynthétiques – Essai de traction des bandes larges.

[55] NF EN ISO 13433 (janvier 2007 – indice de classement : G38-121) : Géosynthétiques – Essai de perforation dynamique (essai par chute d'un cône).

[56] NF EN ISO 11058 (juin 2010 – indice de classement : G38-140) : Géotextiles et produits apparentés – Détermination des caractéristiques de perméabilité à l'eau normalement au plan, sans contrainte mécanique.

[57] NF EN ISO 12956 (juin 2010 – indice de classement : G38-141) : Géotextiles et produits apparentés – Détermination de l'ouverture de filtration caractéristique.

[58] NF EN ISO 12958 (août 2010 – indice de classement : G38-142) : Géotextiles et produits apparentés – Détermination de la capacité de débit dans leur plan.

[59] Comité français des géosynthétiques. *Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration*, 2014.

[60] XP G38-030 (octobre 2008 – indice de classement : G38-030) : Géotextiles, détermination du nombre de constriction.

[61] Bouthot M., Vermeersch O.G., Blond E., Mlynarek J., « The number of constrictions concept as a mean to predict the filtration behavior of nonwoven geotextile filters », *7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, 2002.

[62] NF EN 1997-1 (juin 2005 – indice de classement : P94-251-1) : Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales avec son Annexe nationale (indice de classement : P94-251-1/NA).

[63] NF P94-270 (juillet 2009 – indice de classement : P94-270) : Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Remblais renforcés et massifs en sol cloué.

[64] XP G38-064 (août 2010 – indice de classement : G38-064) : Utilisation des géotextiles et produits apparentés – Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques – Justification du dimensionnement et éléments de conception.

[65] NF EN 14475 (janvier 2007 – indice de classement : P94-326) : Exécution de travaux géotechniques spéciaux – Remblais renforcés.

[66] Villard P., Briançon L., « Dimensionnement des remblais renforcés par géosynthétique en zones sujettes à effondrement – Bilan des connaissances », *Rencontres Géosynthétiques*, Nantes, 2009.

[67] NF EN 13719 (août 2003 – indice de classement : G38-111) : Géotextiles et produits apparentés – Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles en contact avec les barrières géosynthétiques.

[68] NF EN 14574 (septembre 2005 – indice de classement : G38-201) : Géosynthétiques – Détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal de géosynthétiques sur support.

[69] NF X50-091 (octobre 2012 – indice de classement : X50-091) : Qualification – Exigences générales relatives aux organismes de qualification de fournisseurs.

[70] Comité français des géosynthétiques, *Détection des fuites dans les dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques*, 2003.

Principal actionnaire: Info Services Holding. **Société éditrice:** Groupe Moniteur SAS au capital de 333 900 euros. RCS: Paris B 403 080 823 - **Siège social:** 17, rue d'Uzès, 75108 Paris cedex 02. **Numéro de commission paritaire:** 0917 T 82147 - **Président / Directeur de la publication:** Christophe Czajka. **Impression:** Roto Champagne, 2 rue des Frères Garnier, 52000 Chaumont - **Dépôt légal à parution.**

