



HAL
open science

Protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement dans les installations de stockage de déchets - Recommandation d'un géotextile de protection par des essais ex situ pour des sollicitations de service

Guillaume Gaillard

► To cite this version:

Guillaume Gaillard. Protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement dans les installations de stockage de déchets - Recommandation d'un géotextile de protection par des essais ex situ pour des sollicitations de service. Sciences de l'environnement. 2010. hal-02595015

HAL Id: hal-02595015

<https://hal.inrae.fr/hal-02595015>

Submitted on 15 May 2020

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

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



Université Blaise Pascal



Protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement dans les installations de stockage de déchets

- Recommandation d'un géotextile de protection par des essais ex situ pour des sollicitations de service -

Guillaume GAILLARD



DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur
Option Génie Civil**

Juin 2010

☒ : Polytech'Clermont-Ferrand (anciennement CUST) - Département Génie Civil
rue des Meuniers – BP 206 - F 63174 Aubière Cedex (France)

☎ : Secrétariat : +33 (0)4 73 40 76 87 / 76 90 Scolarité : +33 (0)4 73 40 75 05
✉ : +33 (0)4 73 40 75 10 - Mèl : dept.gc@polytech.univ-bpclermont.fr



Université Blaise Pascal



Protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement dans les installations de stockage de déchets

- Recommandation d'un géotextile de protection par
des essais ex situ pour des sollicitations de service -

Guillaume GAILLARD

DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur
Option Génie Civil**

Juin 2010

📍 : Polytech' Clermont-Ferrand (anciennement CUST) - Département Génie Civil
rue des Meuniers – BP 206 - F 63174 Aubière Cedex (France)

☎ : Secrétariat : +33 (0)4 73 40 76 87 / 76 90 Scolarité : +33 (0)4 73 40 75 05

✉ : +33 (0)4 73 40 75 10 - Mèl : dept.gc@polytech.univ-bpclermont.fr

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Mme Cécile LOUMAGNE, chef de l'unité de recherche hydrosystèmes et bioprocédés au Cemagref d'Antony (HBAN), pour m'avoir accueilli au sein de son unité et avoir fait en sorte que ce travail puisse se réaliser dans les meilleures conditions.

Je remercie tout particulièrement Mme Nathalie TOUZE-FOLTZ, chercheur, et M. Didier CROISSANT, chargé des essais géosynthétiques, pour l'encadrement de ce travail, pour l'intérêt et le suivi qu'ils y ont apporté, pour leur disponibilité et pour les nombreux conseils qu'ils ont su me faire partager.

J'adresse ensuite mes remerciements à Mlle Aurélie TALON, enseignante à Polytech' Clermont-Ferrand pour l'attention qu'elle a apporté dans la préparation et le suivi de ce travail.

Je tiens également à remercier les différents producteurs de géotextiles pour m'avoir offert des échantillons et ainsi assurer la réalisation de ce travail (Bonar, Fibertex, Huesker, Juta, Landolt, NAUE, Sicam, Tencate Bidim, Thrace Plastics, Viganó Pavitex).

Enfin, je souhaite remercier, M. Roland GALLO et M. Alain THOMAS ainsi que l'ensemble du personnel du Cemagref du groupement d'Antony pour leur accueil, leur bonne humeur et leur disponibilité de chaque instant.

**Protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement
dans les installations de stockage de déchets**

Guillaume GAILLARD

Polytech' Clermont-Ferrand - Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur -
- Département Génie Civil – juin 2010 -

- Résumé -

Le dispositif d'étanchéité des installations de stockage de déchets est constitué d'une barrière d'argile compactée surmontée éventuellement d'un géosynthétique bentonitique puis d'une géomembrane. En théorie, cette technique permet d'assurer un niveau de protection maximal en évitant le contact entre les éléments polluants et le milieu environnant.

Cependant, des défauts de poinçonnement peuvent exister dans la géomembrane, liés à la mise en place de la couche de drainage, puis en service, au poids des déchets sus jacent.

Certains géotextiles peuvent alors être utilisés pour protéger la géomembrane contre ces effets.

Plusieurs solutions empiriques ou analytiques permettant de dimensionner ce géotextile sont disponibles dans la littérature. Cependant, à ce jour, la seule caractéristique autorisant le choix du produit adapté est la masse surfacique, alors que plusieurs études ont déjà montré que cette seule valeur n'était pas suffisante.

Le premier objectif de ce travail a alors consisté à obtenir un maximum d'information sur un grand nombre de produit de masse surfacique identique. Pour cela, il a fallu se procurer plusieurs géotextiles différents pour ensuite récupérer ou déterminer une grande diversité de caractéristiques physiques et mécaniques issues d'essais normalisés rapides et facilement reproductibles souvent présents dans les fiches techniques afférentes fournies par les producteurs.

Le deuxième objectif de cette étude a été de réaliser des essais d'endommagement plus complexes mais proches des sollicitations de service rencontrées in situ, pour attribuer à chaque géotextile un critère de satisfaction sur sa protection vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.

La méthodologie développée consiste alors à voir s'il est possible de relier ce critère aux autres caractéristiques pour pouvoir recommander un produit par la seule lecture de sa fiche technique.

Mots-clés

Géomembrane – géotextile de protection – géosynthétique bentonitique –
poinçonnement – endommagement – dimensionnement

**Cemagref
Groupement d'Antony
Parc de Tourvoie BP44 – 92163 Antony Cedex
Travaux encadrés par M. Didier Croissant**

Study of geomembranes protection against puncture loading in the storage of waste

Guillaume GAILLARD

Polytech' Clermont-Ferrand - Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur -
- Département Génie Civil – juin 2010 -

- Abstract -

The waterproofness system for storage of waste is made with a compacted clay barrier. On the top you may find a geosynthetic clay liner and a geomembrane. The aim is to avoid contact between the polluted elements and the surrounding environment.

However, defects of puncture may exist in the geomembrane, due to the establishment of the drainage layer, or, during the life of the system, the weight of overlying waste.

Some geotextiles can be used to protect the geomembrane from these effects.

Several empirical or analytical solutions to size the geotextile are available in the literature. However, nowadays, the only characteristic we have to make a choice for is the surface density, while several studies have pointed out that this single value was not sufficient.

Then, the first objective of this work was to get as much information as possible on a large number of products which have the same surface density. That is why, we had to buy different geotextiles and to extract or determine a variety of physical and mechanical properties derived from standardized tests. These tests had to be fast, easily reproducible and are often present in the data sheets provided by the producers.

The second objective of this study was to perform damage tests which are more complex but closer to the service demands encountered in situ. The aim for each geotextile was to assign a criterion of satisfaction concerning his protection from the demands of puncture

The methodology consists in being able to link this parameter to the other characteristics of the geotextile in order to recommend a product thanks to its technical sheet.

Keywords

Geomembrane – protection layer – geosynthetic clay liner – puncture – localised damage – design

Cemagref
Groupement d'Antony
Parc de Tourvois BP44 – 92163 Antony Cedex
Travaux encadrés par M. Didier Croissant

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
RESUME.....	II
ABSTRACT.....	III
TABLE DES MATIÈRES.....	IV
TABLE DES FIGURES.....	V
TABLE DES TABLEAUX.....	VI
ABREVIATIONS UTILISEES.....	VII
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
1 ENDOMMAGEMENT MECANIQUE DES GEOMEMBRANES PAR POINÇONNEMENT DANS LES ISD.....	6
1.1 INTRODUCTION.....	6
1.2 ORIGINES DU POINÇONNEMENT.....	7
1.2.1 CONDITIONS STATIQUES.....	7
1.2.2 CONDITIONS DYNAMIQUES.....	8
1.3 MECANISMES DU POINÇONNEMENT.....	8
1.3.1 ACTIONS SUR LE DEG.....	8
1.3.2 COMBINAISONS D'ACTION ELEMENTAIRES.....	8
1.4 PARAMETRES QUI CONTROLENT LE POINÇONNEMENT.....	9
1.4.1 INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DES GEOSYNTHETIQUES.....	9
1.4.2 INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX NATURELS.....	9
1.4.3 INFLUENCE DES CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE.....	10
2 ESSAIS DE POINÇONNEMENT.....	11
2.1 ESSAIS D'IDENTIFICATION (« INDEX »).....	12
2.2 ESSAIS DE PERFORMANCE.....	19
2.3 SYNTHESE.....	27
3 CARACTERISATION DE L'ENDOMMAGEMENT.....	30
3.1 OBSERVATIONS VISUELLES.....	30
3.2 OBSERVATIONS AU PROFILOMETRE.....	301
3.3 ESSAI DE TRACTION BI-AXIALE.....	301
PARTIE II : RECOMMANDATION D'UN GEOTEXTILE DE PROTECTION POUR DES SOLLICITATIONS DE SERVICE.....	344
1 PRESENTATION DE L'ETUDE.....	355
2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES.....	366
2.1 COLLECTE DES ECHANTILLONS ET DES FICHES TECHNIQUES.....	36
2.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES COMPLEMENTAIRES.....	37
2.2.1 MASSE SURFACIQUE.....	37
2.2.2 POINÇONNEMENT STATIQUE NF P84-507.....	40
2.2.3 MODE DE FABRICATION.....	46
3 REALISATION DES ESSAIS DE PERFORMANCES.....	477
3.1 ESSAI D'ENDOMMAGEMENT STATIQUE.....	47
3.1.1 OBSERVATION VISUELLE.....	48
3.1.2 ESSAIS DE TRACTION BI-AXIALE.....	55
3.2 ESSAI DC.....	57
4 SYNTHESE ET COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS.....	58
CONCLUSION.....	60
BIBLIOGRAPHIE.....	622
ANNEXES.....	666

TABLE DES FIGURES

- Figure 1** : Exemples de dispositifs d'étanchéité équivalents avec utilisation d'un GSB sous géomembrane (MEEDDM, 2009)
- Figure 2** : Composition d'un DEG pour une utilisation en ISD (AFNOR, 2008)
- Figure 3** : Actions élémentaires du poinçonnement (Pirron, 1998)
- Figure 4** : Combinaisons de deux actions élémentaires : éclatement et poinçonnement statique
- Figure 5** : Géométrie de l'appareillage pour l'essai de poinçonnement statique avec petit poinçon sans support (AFNOR, 1996)
- Figure 6** : Appareillage de l'essai de poinçonnement statique NF P84-507 utilisé au laboratoire du Cemagref d'Antony
- Figure 7** : Appareillage de l'essai de poinçonnement des géotextiles (AFNOR, 1988)
- Figure 8** : Appareillage de l'essai de poinçonnement pyramidal sur support rigide (Benneton et al., 2008)
- Figure 9** : Appareillage de l'essai de poinçonnement pyramidal sur support souple et calcul de la déformation (AFNOR, 2005)
- Figure 10** : Appareillage de l'essai de poinçonnement CBR (AFNOR, 2006)
- Figure 11** : Appareillage de l'essai de poinçonnement par chute de cône (AFNOR, 2007)
- Figure 12** : Appareillage nécessaire à la détermination de la résistance au poinçonnement dynamique (AFNOR, 1992)
- Figure 13** : Appareillage nécessaire à la détermination de la résistance au percement par granulats sur support rigide. (AFNOR, 2002)
- Figure 14** : Appareillage pour l'essai de détermination de l'efficacité de protection des géotextiles (AFNOR, 2003)
- Figure 15** : Appareillage de l'essai de poinçonnement hydrostatique et géométrie des cônes (Loading Point Puncturability Analysis of Geosynthetic Liner Materials, 1988)
- Figure 16** : Appareillage de l'essai de poinçonnement hydrostatique (AFNOR, 2008)
- Figure 17** : Schéma de l'appareillage de l'essai d'endommagement statique
- Figure 18** : Appareillage de l'essai d'endommagement statique utilisé au laboratoire du Cemagref d'Antony
- Figure 19** : Appareillage de l'essai DC (Guéret, 2009)
- Figure 20** : Représentation schématique d'endommagements de type 'déformation' – Déformation due (1) à un élément proéminent et (2) à un défaut de planéité du support observé après démontage
- Figure 21** : Schéma de principe de l'essai de traction bi-axiale
- Figure 22** : Appareillage utilisé pour les essais de traction bi-axiale
- Figure 23** : Exemples de résultats des essais de traction biaxiale sur géomembranes testées à l'essai d'endommagement statique
- Figure 24** : Mode opératoire du prélèvement des éprouvettes pour la masse surfacique
- Figure 25** : Découpe des échantillons
- Figure 26** : Relation masse et résistance au poinçonnement statique NF P84-507
- Figure 27** : Schématisation de la traction dans un géotextile lors de l'essai NF P84-507
- Figure 28** : Déformation d'un géotextile durant l'essai NF P84-507
- Figure 29** : Mode de rupture de l'essai NF P84-507
- Figure 30** : Planning des essais d'endommagement statique
- Figure 31** : Exemple de type de défauts
- Figure 32** : Observations visuelles détaillées sur l'essai d'endommagement statique
- Figure 33** : Prélèvement d'une éprouvette pour l'essai de traction bi-axiale

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Normes d'essais physiques et mécaniques pour le marquage «CE» et la certification «ASQUAL»

Tableau 2 : Comparaison des principaux essais sur DEG en ISD

Tableau 3 : Caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles en 1000g/m² utilisés

Tableau 4 : Masse surfaciques mesurées au laboratoire

Tableau 5 : Résultats du poinçonnement statique NF P84-507

Tableau 6 : Modules d'élasticité apparents

Tableau 7 : Mode de fabrication des géotextiles utilisés

Tableau 8 : Synthèse sur les observations visuelles

Tableau 9 : Résultats des essais de traction bi-axiale

Tableau 10 : Résultats sur la protection des GTX pour l'essai d'endommagement statique

Tableau 11 : Enfoncement final du piston lors de l'essai DC

Tableau 12 : Tableau général des caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles ainsi que leur niveau de satisfaction vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement

ABREVIATIONS UTILISEES

AFNOR : Association Française de Normalisation

ASTM : American Society for Testing and Materials

ASQUAL : Association pour la promotion de l'Assurance Qualité dans la filière textile-habillement

CBR : Californian Bearing Ratio

CFG : Comité Français des Géosynthétiques

COFRAC : Comité Français d'Accréditation

DC : Damaging cylinder

DEG : Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane

GMB : Géomembrane

GMB-B : Géomembrane bitumineuse

GMB-P : bitumineuse polymérique

GSB : Géosynthétique Bentonitique

GTB : Géotextile Bentonitique

GTX : Géotextile

ISD : Installation de Stockage de Déchets

MEDD : Ministère de l'Écologie et du Développement Durable

MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

INTRODUCTION

Une Installation de Stockage de Déchets (ISD) non dangereux, est définie par l'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de « déchets non dangereux » comme installation d'élimination de déchets non dangereux par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre.

Souvent contestées elles s'inscrivent néanmoins aujourd'hui dans le cadre du développement durable avec la valorisation énergétique du biogaz, gaz issu des réactions de fermentation s'opérant au sein de certains déchets. Afin de rester dans cette démarche, il faut également assurer la protection des sols et des eaux souterraines contre la pollution engendrée par les lixiviats issus de la percolation des eaux de pluie à travers les déchets.

Pour ce faire, la réglementation française impose à travers l'arrêté du 9 septembre 1997 (Code Permanent Environnement et Nuisances, 1997) modifié par l'arrêté du 31 décembre 2001 (Journal Officiel, 2002a), l'arrêté du 3 avril 2002 (Journal Officiel, 2002b) et l'arrêté du 19 janvier 2006 (Journal Officiel, 2006) relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, 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 réglementation française est conforme à la directive européenne 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 (Journal Officiel du conseil de l'Union Européenne, 1999) concernant la mise en décharge de déchets. En effet, celle-ci stipule que dans les installations de stockage de déchets "la protection du sol, des eaux souterraines et des eaux de surface doit être assurée pendant la phase d'exploitation/activité par une barrière géologique assortie d'un revêtement de base étanche". Les caractéristiques de la barrière géologique requise sont identiques à celles mentionnée par la réglementation française.

Dans la réglementation française, la barrière de sécurité passive est normalement constituée par le substratum du site qui doit présenter, de haut en bas, une conductivité hydraulique inférieure à 10^{-9}m.s^{-1} sur au moins un mètre et inférieure à 10^{-6}m.s^{-1} sur au moins cinq mètres. La couche de conductivité hydraulique inférieure à 10^{-9}m.s^{-1} sera dans la suite dénommée argile. Lorsque la barrière géologique ne répond pas naturellement aux conditions précitées, elle peut être complétée artificiellement et renforcée par d'autres moyens présentant une protection équivalente.

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 (MEDD, 2002). Parmi les mesures compensatrices proposées relativement à la constitution de la barrière de sécurité passive, le recours à un géosynthétique bentonitique (GSB) est une solution courante. En effet le GSB peut utilement renforcer les couches en matériaux argileux naturels, voire s'y substituer sur une certaine épaisseur (MEEDDM, 2009). Un géosynthétique bentonitique est défini d'après la norme XP P84-700 comme un produit manufacturé, en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comportant au moins de la bentonite assurant la fonction étanchéité et un géosynthétique, utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil (AFNOR, 2008a). Les géosynthétiques bentonitiques les plus couramment utilisés sont des géotextiles bentonitiques (GTB), qui contiennent de la bentonite encapsulée entre deux géotextiles. Dans la suite, nous distinguerons le GSB de l'argile qu'il renforce, ces deux éléments faisant partie de la barrière de sécurité passive. La figure 1 présente différentes constitutions possibles de barrières de sécurité passives.

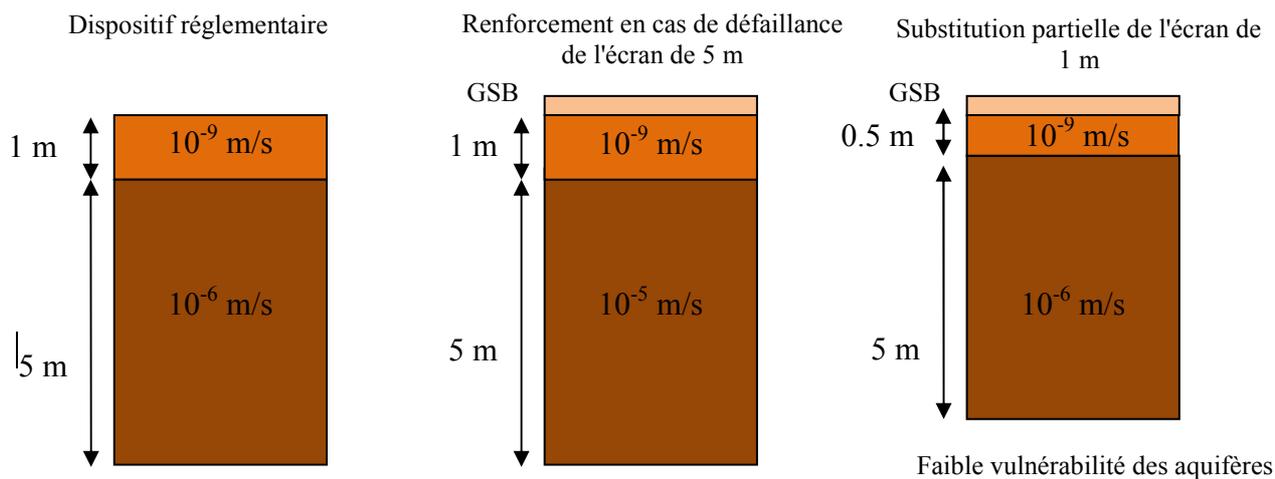


Figure 1 : Exemples de dispositifs d'étanchéité équivalents avec utilisation d'un GSB sous géomembrane (MEEDDM, 2009)

La barrière de sécurité active comprend une géomembrane (GMB) ou tout dispositif équivalent, surmontée d'une couche drainante qui assure le drainage et la collecte des lixiviats et évite ainsi la sollicitation hydraulique de l'argile. D'après la norme NF P84-500 (AFNOR, 1998) la géomembrane est définie comme un produit adapté au génie civil, mince, souple, continu, étanche aux liquides même sous les sollicitations de service. Ni les produits de faible épaisseur fonctionnelle (inférieure à 1mm), ni les produits dont la largeur de fabrication est inférieure à 1,5m ni les produits dont l'étanchéité est assurée par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géomembranes. De plus, le flux traversant la géomembrane et mesuré suivant la norme NF EN 14150 (AFNOR, 2006a) doit être inférieur à $10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$. En Europe, la quasi-totalité des géomembranes utilisées en fond d'installations de stockage de déchets sont en polyéthylène haute densité (PEHD) de 2 à 2,5 mm d'épaisseur (Touze-Foltz et al., 2008a) car ce matériau résiste mieux aux agressions chimiques que les matériaux composant les autres types de géomembranes. La couche drainante est quand à elle constituée de granulats roulés ou concassés de dimension 20/40 sur une hauteur minimale de 0,5m.

Bien que le concept donné par la réglementation française tende à découpler la géomembrane de l'argile, ces deux éléments de l'étanchéité interagissent fortement d'un point de vue hydraulique. C'est pourquoi on utilise le terme d'étanchéité composite, lorsqu'on parle de l'association de ces deux éléments de l'étanchéité. Dans les installations de stockage de déchets, cette étanchéité composite se retrouve alors dans ce que l'on appelle un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG). Un DEG associe plusieurs structures. Chaque structure est constituée de plusieurs composants, géosynthétiques et/ou matériaux naturels qui assurent les fonctions d'étanchéité, protection, drainage, filtration et séparation comme indiqué à la figure 2.

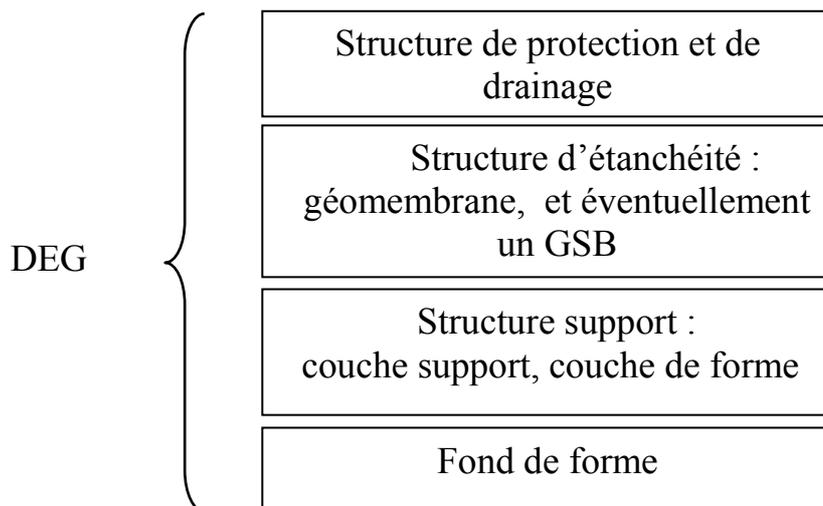


Figure 2 : Composition d'un DEG pour une utilisation en ISD (AFNOR, 2008a)

La structure support est l'ensemble des éléments placés entre le fond de forme et la structure d'étanchéité. Elle est composée de la couche support sur laquelle repose la structure d'étanchéité et de la couche de forme qui repose sur le fond de forme et qui doit présenter un état de surface compatible avec la pose du GSB (AFNOR, 2008a). On évitera également de constituer la structure support avec le fond de forme lui-même car des aspérités, subaffleurantes et non visibles à l'origine, peuvent se révéler agressives lors des passages d'engins au cours de l'installation de la géomembrane ou des couches de protection.

Le recours aux étanchéités composites géomembrane-argile ou géomembrane-géotextile bentonitique n'apporte pas cependant une solution parfaite aux problèmes de protection des sols et des nappes. En effet, les différentes substances contenues dans les lixiviats peuvent s'écouler à travers cette étanchéité composite, soit sous l'action de gradients de concentration – ce sont les transferts diffusifs – soit sous l'action de gradients de charge hydraulique – ce sont les transferts advectifs –. Les transferts advectifs sont liés à l'existence de défauts dans la géomembrane. On désigne sous le terme défaut une non continuité de la géomembrane entraînant un transfert advectif entre ses deux faces, quelle qu'en soit l'origine (soudure défectueuse entre lés de géomembrane ou origine mécanique). Ces défauts représentent pour les lixiviats des passages préférentiels d'écoulement.

La plus grande densité de défauts est générée par la couche drainante granulaire (Touze-Foltzet Giroud, 2003). C'est pour cela qu'on utilise également un géotextile (GTX) antipoinçonnant mis en place au-dessus de la géomembrane pour la protéger. Mais il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de dimensionnement unanimement reconnue de cet élément. Par contre l'utilisation d'un géotextile entre la couche support et la géomembrane pour ses propriétés de protection face aux contraintes de poinçonnement ne peut pas être envisagée en ISD car il faciliterait la propagation des lixiviats en cas de perforation de la géomembrane (Touze-Foltz et al., 2006).

Ce travail de stage, qui poursuit les études menées par Arnaud AUFRERE et Alexandre GUERET contribue à l'établissement d'une approche ex situ visant à déterminer les caractéristiques pertinentes d'un géotextile pour l'évaluation de la fonction de protection de la géomembrane à long terme vis-à-vis des sollicitations de service.

La première partie de ce document consiste en une synthèse bibliographique qui permet tout d'abord de se familiariser avec les mécanismes et paramètres qui contrôlent le poinçonnement des géomembranes. Puis les principaux essais de poinçonnement praticables en laboratoire à l'heure actuelle sont présentés.

La seconde partie de ce mémoire est consacrée à la présentation des expérimentations réalisées dans le cadre du stage, ainsi qu'à leur interprétation. Onze géotextiles de protection différents de même masse surfacique, ont été utilisés afin de pouvoir couvrir le marché français. La multiplicité de géotextiles testés permet de disposer de gammes de caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles. L'objectif de l'obtention de cette gamme était de tenter de corréler la protection contre l'endommagement des géomembranes à d'autres caractéristiques que la seule masse surfacique des géotextiles, seule caractéristique utilisée aujourd'hui dans les différentes méthodes de dimensionnement.

Ce travail de mémoire a permis de montrer, que la protection apportée par un géotextile est fonction de caractéristiques non présente dans les fiches techniques des producteurs. Elles sont, le module d'élasticité apparent, la longueur et disposition des fibres, et surtout l'homogénéité du produit.

PARTIE I :

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première partie a pour objectif de familiariser le lecteur avec les mécanismes et paramètres qui contrôlent le poinçonnement avant de présenter les différents essais réalisables ex situ permettant de quantifier la protection contre le poinçonnement.

1 Endommagement mécanique des géomembranes par poinçonnement dans les ISD

Les éléments présentés dans ce paragraphe sont pour une grande part issus d'une ébauche de rédaction par le groupe de travail "Poinçonnement" du Comité Français des Géosynthétiques (CFG) qui ambitionne de rédiger un fascicule de recommandations pour le dimensionnement de la protection des géomembranes contre le poinçonnement pour des applications hydrauliques et géoenvironnementales des géosynthétiques, dont l'utilisation en installations de stockage de déchets.

1.1 Introduction

Les géomembranes peuvent être exposées à des sollicitations mécaniques de poinçonnement sévères conduisant à leur endommagement. Ces sollicitations, rencontrées à la mise en œuvre et/ou en service, peuvent engendrer des dégâts allant du défaut de surface au percement de la géomembrane, nuisant ainsi à son intégrité et à sa pérennité.

L'endommagement mécanique des géomembranes par poinçonnement résulte de la mise en contact de cailloux, granulats ou tout autre objet ou élément de structure, pointu ou proéminent, avec le complexe géosynthétique du DEG. Cependant, les contraintes générées sur le complexe géosynthétique peuvent être également des contraintes de frottement, avec abrasion, et de poinçonnement localisé. Il peut en résulter pour la géomembrane des endommagements de surface (marques, griffures), une déformation (rémanente ou non), voire un percement. Lors de la mise en œuvre du matériau de recouvrement, il y a application d'une surcharge par circulation des engins, avec éventuellement compactage, et également déplacement des granulats. Il y a donc compression de la couche granulaire sur le complexe géosynthétique et, dans une moindre mesure, ripage des granulats.

L'état ultime de l'endommagement est le percement de la géomembrane. Cependant, toute autre forme d'endommagement peut nuire à la pérennité de la géomembrane. En effet, toute déformation ou rayure excessive entraîne une dégradation des caractéristiques physiques et mécaniques des géosynthétiques, risquant d'affecter les propriétés d'étanchéité à long terme. Le défaut peut évoluer en perforation par mise en traction, fluage, fissuration sous contrainte...

L'endommagement de la géomembrane, dans un contexte donné, dépend :

- des caractéristiques des géosynthétiques (géomembrane et géotextile(s)) : nature du polymère, type de fabrication, masse surfacique, épaisseur ...;
- de la qualité des matériaux en contact avec le complexe géosynthétique : granulométrie, angularité, portance, rhéologie ;
- des conditions de mise en œuvre de la structure de recouvrement : modalités de mise en place du matériau, énergie de compactage, épaisseur de la couche compactée...;
- des contraintes en service.

1.2 Origines du poinçonnement

Le poinçonnement est un “défaut mécanique localisé” issu d’actions élémentaires statiques et dynamiques.

Dans le cas des conditions statiques deux situations peuvent être rencontrées : le poinçonnement statique et l’éclatement.

1.2.1 Conditions statiques

✓ Poinçonnement statique

Le risque de poinçonnement commence pendant l’installation, dès qu’un matériau agressif (graviers, outils, racines,...) est en contact avec le DEG sous une contrainte normale statique. A court terme, cette contrainte est principalement due à la circulation sur la couche drainante. A long terme, la contrainte correspond au poids des déchets des couches sus-jacentes.

Les principaux paramètres qui contrôlent cette action sont :

- la forme du matériau poinçonnant ;
- la force appliquée normalement sur ce matériau poinçonnant ;
- la rigidité du support.

Le résultat de cette action est la compression locale du DEG. En fonction de la rigidité du support, une mise en traction peut survenir. Mais il y a toujours une part de compression même pour le cas limite de poinçonnement statique sans support.

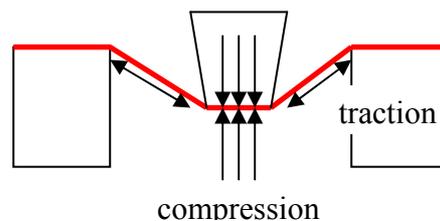


Figure 3 : Actions élémentaires du poinçonnement (Pirrion, 1998)

✓ Eclatement

Avec les recommandations de planéité et de portance du sol support présente dans le fascicule n°12 du CFG « Recommandations Générales pour la Réalisation d’Étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques » (CFG, 1998), ce phénomène ou le DEG recouvre une cavité (entre deux agrégats ou à cause d’un tassement différentiel) et y est poussé sous l’action de la contrainte normale, ne devrait pas avoir lieu. C’est généralement un effet à court terme.

Les principaux paramètres contrôlant cette action sont :

- la taille de la cavité ;
- la contrainte normale sur le DEG.

Le résultat de cette action est une mise en traction du DEG.

1.2.2 Conditions dynamiques

Ces conditions correspondent au poinçonnement dynamique dû à la chute de pierres, de graviers ou d'outils. Le risque de poinçonnement se produit pendant la phase d'installation du DEG.

Les principaux paramètres qui contrôlent cette action sont :

- la forme du matériau poinçonnant ;
- l'énergie de chute (poids \times hauteur) ;
- la rigidité du support.

Le résultat de cette action est la compression locale du DEG. En fonction de la rigidité du support, la mise en traction peut également se produire. La traction est maximale pour le cas limite "sans support".

1.3 Mécanismes du poinçonnement

1.3.1 Actions sur le DEG

Pour tout endommagement mécanique élémentaire localisé, l'action résultante sur le DEG est toujours une combinaison d'une part de traction et d'autre part de compression. Deux cas limites définissent la gamme de variation des composantes de la traction :

- support rigide : pas de traction, forte compression ;
- pas de support : forte traction, compression moyenne.

Entre ces deux cas limites, la rigidité du support varie de souple à dure. L'action correspondante sur le DEG peut être interpolée en variant les parts respectives de traction et de compression.

1.3.2 Combinaisons d'actions élémentaires

Des situations plus complexes peuvent être divisées en plusieurs mécanismes élémentaires précédemment décrits. On peut par exemple imaginer le cas décrit à la figure 4. Il correspond à la combinaison d'éclatement et de poinçonnement statique sans support.

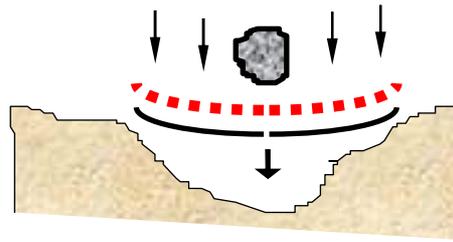


Figure 4: Combinaisons de deux actions élémentaires : éclatement et poinçonnement statique

L'action résultante sur le DEG est pour une large part de la traction et pour une petite part de la compression locale.

1.4 Paramètres qui contrôlent le poinçonnement

1.4.1 Influence des caractéristiques des géosynthétiques

Le polymère de base du géotextile et son origine (recyclé ou naturel) ainsi que son mode de fabrication (non-tissé, tissé, longueur des fibres) influent sur le niveau de l'endommagement de la géomembrane.

Dans le cas d'un complexe géosynthétique, le comportement face à l'endommagement, dans un contexte donné, dépendra bien évidemment des propriétés de chacun des éléments.

1.4.2 Influence des caractéristiques des matériaux naturels

Le support sur lequel repose le complexe géosynthétique intervient par sa portance, son état de surface, son ouverture (dimensions des vides en surface) et par la présence éventuelle d'éléments grossiers.

En première approche, la portance peut être définie par des essais géotechniques tels qu'essai à la plaque ou à la dynaplaque. Cette portance macroscopique devra éventuellement être complétée par une information sur la portance locale du support. En effet, les éléments poinçonnant le complexe géosynthétique sont de taille plus petite que ces plaques d'essais et la portance estimée sur une grande surface peut ne pas être représentative du comportement local du support.

Le matériau de recouvrement intervient sur l'endommagement par sa nature, sa granulométrie et l'angularité des éléments granulaires. Un matériau grossier, à granulométrie uniforme ou discontinue, comportant des éléments concassés et anguleux génère des sollicitations très sévères sur le complexe géosynthétique.

La nature des éléments grossiers, et donc le risque d'évolution du granulat lors de la mise en œuvre devra aussi être pris en compte : des granulats roulés soumis à une forte charge peuvent présenter des bords saillants par éclatement.

Pour ces deux types de matériaux la granulométrie est importante et, plus encore, c'est la taille des plus gros éléments en contact du complexe géosynthétique qui est le plus critique.

Si le support ou la couche de recouvrement sont composées de plusieurs couches de matériaux différents, chacune devra être considérée. Pour ce qui concerne le support, c'est le risque de déformation de la couche inférieure qui devra être pris en compte. Pour la couche de recouvrement, c'est la transmission des contraintes depuis l'engin jusqu'aux géosynthétiques qui devra être examinée.

1.4.3 Influence des conditions de mise en œuvre

Le travail qui fait l'objet de ce mémoire ne concerne que les charges de services. Il peut cependant être intéressant de discuter des charges de mise en œuvre afin de mieux appréhender certains paramètres qui pourraient se révéler judicieux de prendre en compte pour une recommandation ex situ d'un géotextile de protection.

Pour cela il faut savoir que la contrainte exercée sur le complexe géosynthétique à la mise en œuvre dépend des modalités de mise en place de la couche de recouvrement par les engins mécaniques.

La seule circulation d'engins peut entraîner d'importants dégâts sur le complexe géosynthétique, et notamment lorsque les véhicules tournent, démarrent ou freinent alors qu'ils évoluent sur la couche de recouvrement en cours de mise en œuvre. De manière générale, on prendra les dispositions nécessaires, à la conception, pour éviter ce type de sollicitations. Cependant, si la réalisation de l'ouvrage envisage de telles manœuvres, elles devront être simulées lors de planches d'essais.

Dans ce cas, les paramètres à considérer sont l'épaisseur de la couche de recouvrement, le poids des engins, le type de pneumatiques ou de chenilles, le type de manœuvres envisagées.

Les recommandations (Code Permanent Environnement et Nuisances, 1997) préconisent généralement une mise en œuvre à l'avancement et une couche de matériau d'épaisseur minimale supérieure à 0,5 m.

Par ailleurs, les conditions atmosphériques ont une importance, et tout particulièrement la température ambiante et la température de la géomembrane lors de la mise en œuvre. En effet, les géomembranes PEHD se dilatent facilement et peuvent former des ondes (ou plis) pendant les journées chaudes et se mettre en tension pendant les nuits fraîches.

2 Essais de poinçonnement

L'apposition du marquage «CE» est une obligation pour tous les géosynthétiques depuis le 1er janvier 2003 afin de leurs permettre de circuler et d'être commercialisés librement sur le marché de l'Espace économique européen.

Il indique selon la fonction remplie par le géosynthétique dans un ouvrage donné ou une application spécifique, les caractéristiques pertinentes qu'il convient de spécifier ainsi que les méthodes d'essais appropriées pour la détermination de ces caractéristiques.

Il ne donne aucune garantie sur la qualité du produit ou sur le niveau de performance minimal.

Ce marquage est à distinguer de la certification «ASQUAL», qui est une association impartiale sans but lucratif créée par des centres techniques avec pour objectif la promotion de la qualité et de la certification des géosynthétiques. C'est une démarche volontaire du producteur. Bien que dans cette certification on ne se rattache pas à un ouvrage, les caractéristiques spécifiées sont au minimum identiques, avec des modes opératoires plus précis, et sont déterminées dans des laboratoires indépendants pour être comparés aux valeurs annoncées par le producteur avec des tolérances fixées.

Les différents essais requis par le marquage CE pour une utilisation dans les installations de stockage de déchets solides sont définis par les normes NF EN 13257 (AFNOR, 2005a) pour les géotextiles et produits apparentés et NF EN 13493 (AFNOR, 2006b) pour les géomembranes et géosynthétiques bentonitiques.

Ils figurent dans le tableau 1 avec les essais nécessaire à la certification ASQUAL.

	Marquage CE			Certification ASQUAL		
	EN 13257 GTX	EN 13493 GMB-B GMB-P	EN 13493 GSB	GTX	GMB-B GMB-P	GSB
Physiques	Epaisseur		EN 1849-1 EN 1849-2	EN 964-1	EN ISO 9863-1	EN 1849-1 EN 1849-2
	Masse surfacique		EN 1849-1 EN 1849-2	EN 14196	EN ISO 9864	EN 1849-1 EN 1849-2
Mécaniques	Résistance à la traction	EN ISO 10319	EN 12311-1 EN 12311-2	EN ISO 10319	EN ISO 10319	EN 12311-1 EN 12311-2
	Déformation	EN ISO 10319	EN 12311-1 EN 12311-2	EN ISO 10319	EN ISO 10319	
	Poinçonnement statique (CBR)	voir efficacité de la protection	EN ISO 12236	EN ISO 12236	EN ISO 12236	
	Résistance au poinçonnement				NF G 38-019	NF P 84-507
	Résistance à la perforation dynamique (chute de cône)	EN ISO 13433			EN ISO 13433	
	Résistance à l'éclatement		pr EN 14151	pr EN 14151		
	Résistance à la déchirure		EN 12310-1 ISO 34			
	Caractéristiques de frottement (cisaillement direct)	EN ISO 12957-1	EN ISO 12957-1	EN ISO 12957-1		
	Caractéristiques de frottement (plan incliné)	EN ISO 12957-2	EN ISO 12957-2	EN ISO 12957-2		
	Fluage en compression				EN ISO 25619-1	
Fluage en traction				EN ISO 13431		

CBR : Californian Bearing Ratio

GMB-B : Géomembrane bitumineuse

GMB-P: bitumineuse polymérique

Tableau 1 : Normes d'essais physiques et mécaniques pour le marquage «CE» et la certification «ASQUAL»

Les cases grisées signifient qu'aucune norme n'est définie pour le marquage ou la certification. On retrouve également en rouge les références des normes obligatoires pour tous les types d'ouvrages, en vert celles applicables dans toutes les conditions d'utilisation d'un même ouvrage et enfin en bleu, celles applicables dans des conditions d'utilisation spécifiques.

Dans cette partie nous allons seulement présenter les essais relatifs au poinçonnement intervenant dans ces certifications (surlignés en jaune dans le tableau 1) ainsi que d'autres essais normalisés intéressants réalisés à l'heure actuelle en laboratoire également relatifs à l'étude du poinçonnement des géomembranes, géotextiles et produits apparentés. Tout ceci en commençant par les essais simplifiés d'identification/contrôle (ou «essais index») pour finir avec les essais de «performances».

Nous essayerons également, dans la mesure du possible, d'analyser les avantages et/ou inconvénients de chacun de ces essais.

Par la suite, lorsque l'on parlera de DEG, il s'agira du complexe géosynthétique-géomembrane.

2.1 Essais d'identification (« INDEX »)

Les essais d'identification (« index ») de laboratoire permettent de caractériser les produits par des modes opératoires simples, rapides et facilement reproductibles. Ils sont cependant éloignés des sollicitations réelles auxquelles sont soumis les géosynthétiques, c'est pourquoi ils servent plus fréquemment au contrôle de la production en usine et à l'identification des géosynthétiques.

Ces essais pourront donc être amenés à jouer un rôle en ce qui concerne l'étude de la protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement, dans la mesure où il sera nécessaire de caractériser le matériau de protection employé. De plus, les essais « index » ont parfois été mis en relation avec des approches de dimensionnement du géotextile de protection (Duquennoy et Artières, 1997).

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons alors présenter les essais d'identification relatifs au poinçonnement pratiqués à l'heure actuelle en laboratoire.

✓ Norme NF P84-507 : « Détermination de la résistance au poinçonnement statique des géomembranes et des dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) - Cas du poinçon cylindrique de petit diamètre (8mm) sans support »

Cet essai de poinçonnement statique sans support, s'applique aux géomembranes et DEG et intervient dans la certification ASQUAL des géomembranes.

Il consiste à perforer avec un poinçon de forme cylindrique de petit diamètre (8mm), à une vitesse constante de 50 mm/min un échantillon de géomembrane ou d'un DEG, fixés sans tension préalable sur une ouverture de diamètre 45 mm.

Les valeurs de force et d'enfoncement sont alors mesurées en continu à l'aide de capteur de force et de déplacement et d'un dispositif d'enregistrement des couples forces, déplacements, permettant le traçage des courbes correspondantes (AFNOR, 1996).

La figure 5 présente la géométrie du bâti et du poinçon alors que la figure 6 est une photo de l'appareillage utilisé au laboratoire du Cemagref d'Antony.

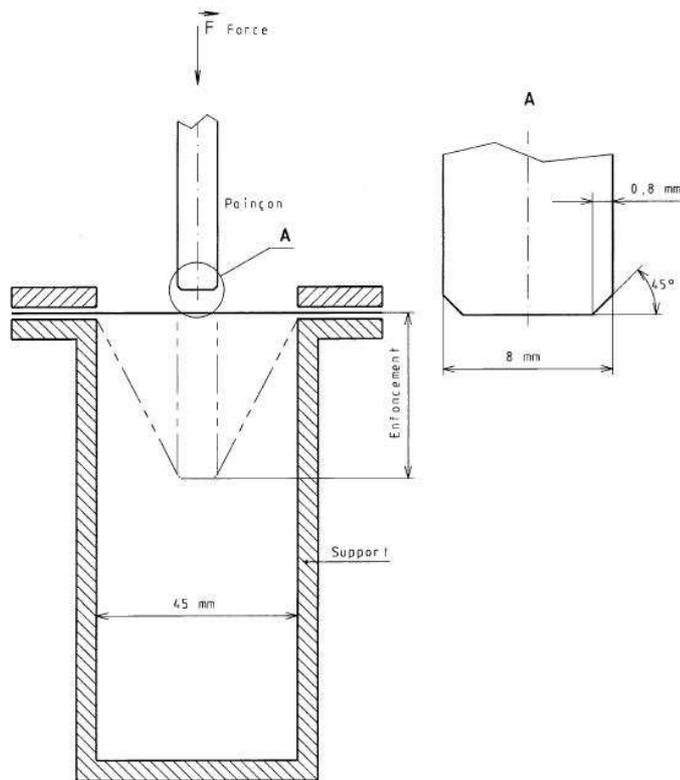


Figure 5 : Géométrie de l'appareillage pour l'essai de poinçonnement statique avec petit poinçon sans support (AFNOR, 1996)

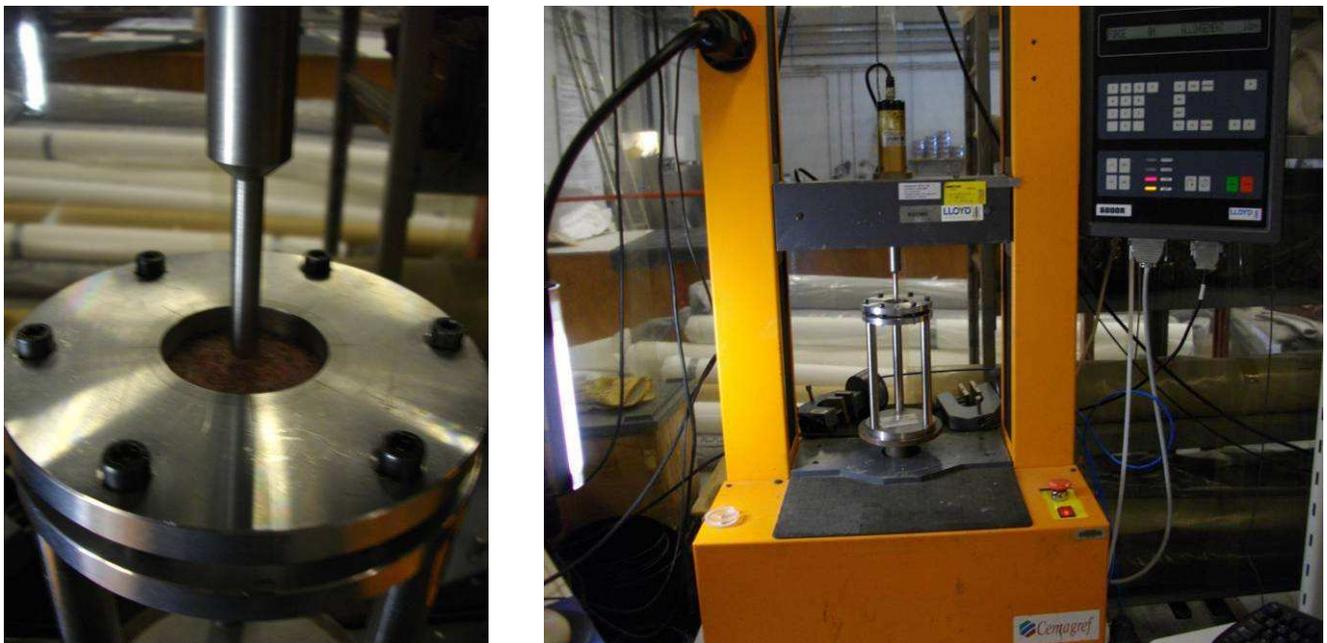


Figure 6 : Appareillage de l'essai de poinçonnement statique NF P84-507 utilisé au laboratoire du Cemagref d'Antony

✓ **Norme NF G38-019 : « Détermination de la résistance au poinçonnement »**

Cet essai de poinçonnement statique ne s'applique qu'aux géotextiles se présentant sous forme de nappe, et dont la dimension des mailles reste inférieure à 5 mm dans le cas de grilles ou de tricots. Il intervient dans la certification ASQUAL des géotextiles.

Il a pour principe de déterminer la force nécessaire pour assurer la traversée d'une éprouvette de géotextile par un poinçon pyramidal à une vitesse de 50 mm/min, perpendiculairement au plan du géotextile.

La figure 7 montre l'appareil utilisé pour l'essai, à savoir un bâti circulaire d'un diamètre intérieur de 50 mm de 100 mm de hauteur, ainsi que la géométrie de poinçon (pyramide droite à base carrée).

Il s'agit d'un essai similaire à l'essai de poinçonnement par poinçon cylindrique sans support, les seules différences résidant dans la forme du piston, et les produits auxquels ils s'appliquent (AFNOR, 1988).

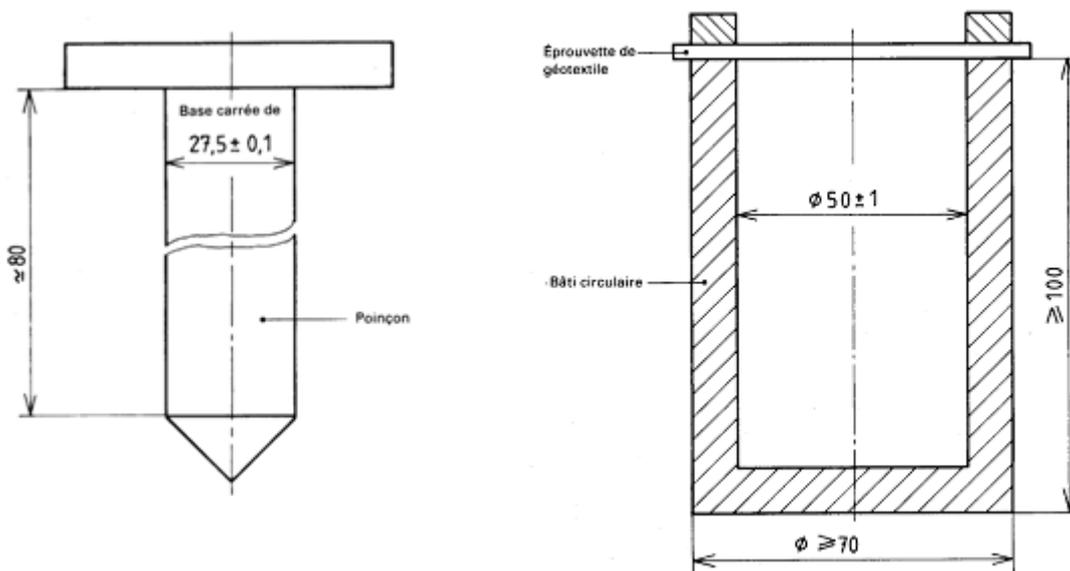


Figure 7: Appareillage de l'essai de poinçonnement des géotextiles (AFNOR, 1988)

✓ **Norme NF EN 14574 : « Détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal de géosynthétiques sur support »**

Une éprouvette de géotextile ou de DEG, est placée sur une plaque en aluminium supportée par une base en acier. On applique au centre de l'éprouvette une charge au moyen d'un poinçon pyramidal en acier et on augmente cette charge jusqu'au percement.

Un circuit électrique indique le moment où le poinçon, après avoir traversé l'échantillon de géosynthétique, entre en contact avec la plaque en aluminium. Le poinçon se déplace à une vitesse faible de 1mm/min (afin de pouvoir stopper l'essai lorsque le poinçon touche la plaque en aluminium, pour éviter d'endommager le poinçon et par conséquent, disperser les résultats).

On mesure alors la force nécessaire à la perforation de l'échantillon (AFNOR, 2005b).

La figure 8 présente l'appareillage utilisé.

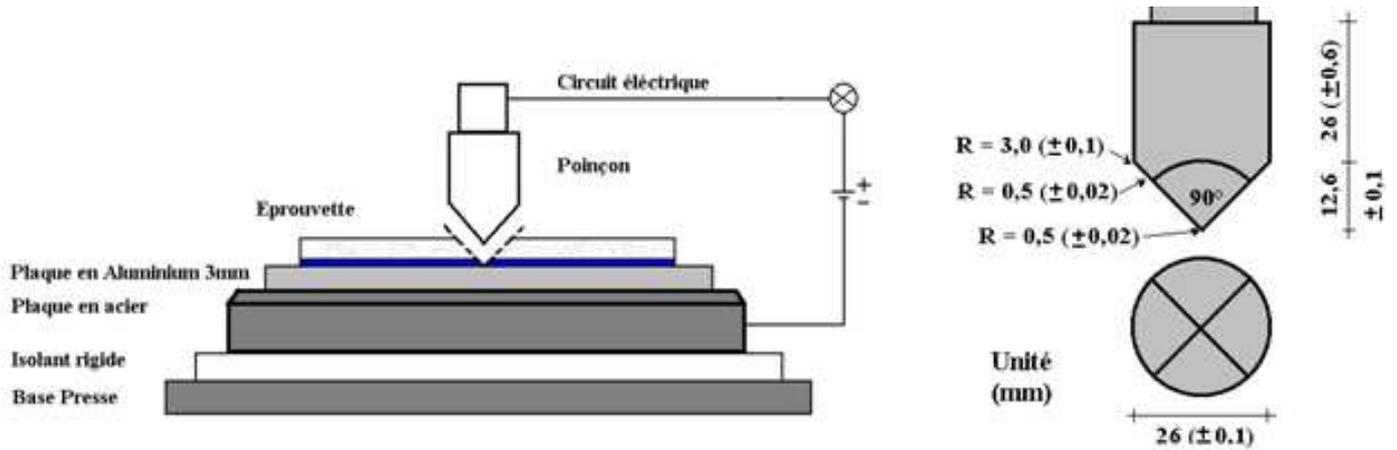


Figure 8: Appareillage de l'essai de poinçonnement pyramidal sur support rigide (Benneton et al., 2008)

Pour réaliser un essai sur support souple, l'échantillon de géosynthétique à tester est maintenu par un mors annulaire au dessus d'une mousse élastique en polyuréthane de caractéristiques définies. Il s'agit là aussi de venir poinçonner le géosynthétique au centre de l'éprouvette jusqu'à sa rupture à une vitesse de 50 mm/min.

La figure 9 montre le dispositif de l'essai, qui se compose d'un moule CBR (150 mm de diamètre) permettant une course du poinçon de 150 mm au minimum. Une plaque métallique flexible permet ici aussi la détection de la perforation par voie électrique. La force de perforation et l'allongement enregistrés constituent les paramètres permettant de déterminer l'efficacité de protection de l'éprouvette.

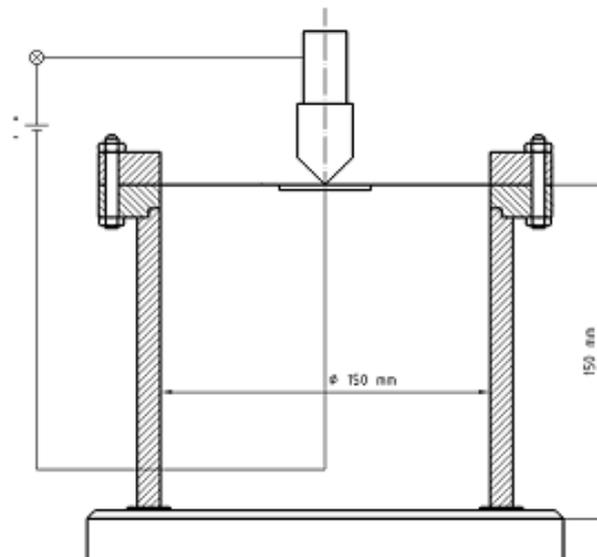


Figure 9: Appareillage de l'essai de poinçonnement pyramidal sur support souple et calcul de la déformation (AFNOR, 2005b)

Les mesures retenues sont alors la force de poinçonnement maximale obtenue lors de l'essai et la déformation à rupture calculée à partir de la mesure du déplacement vertical correspondant.

✓ **Norme NF EN ISO 12236 : « Essai de poinçonnement statique (essai CBR) »**

L'essai de poinçonnement CBR s'applique à tous les géosynthétiques présentant un degré d'ouverture des mailles inférieur à 10 mm. Il intervient dans le marquage CE des géomembranes et dans la certification ASQUAL des géotextiles.

Il vise à déterminer la résistance au poinçonnement des géosynthétiques par l'enfoncement à une vitesse de 50 mm/min, d'un poinçon cylindrique de 50 mm de diamètre, à base plane et relativement large, au travers d'éprouvettes fixées entre deux anneaux en acier. La figure 10 montre l'appareillage utilisé pour la réalisation de l'essai, qui se compose de deux mors annulaires présentant une ouverture de 150 mm de diamètre entre lesquels est placé l'échantillon de géosynthétique (AFNOR, 2006c)

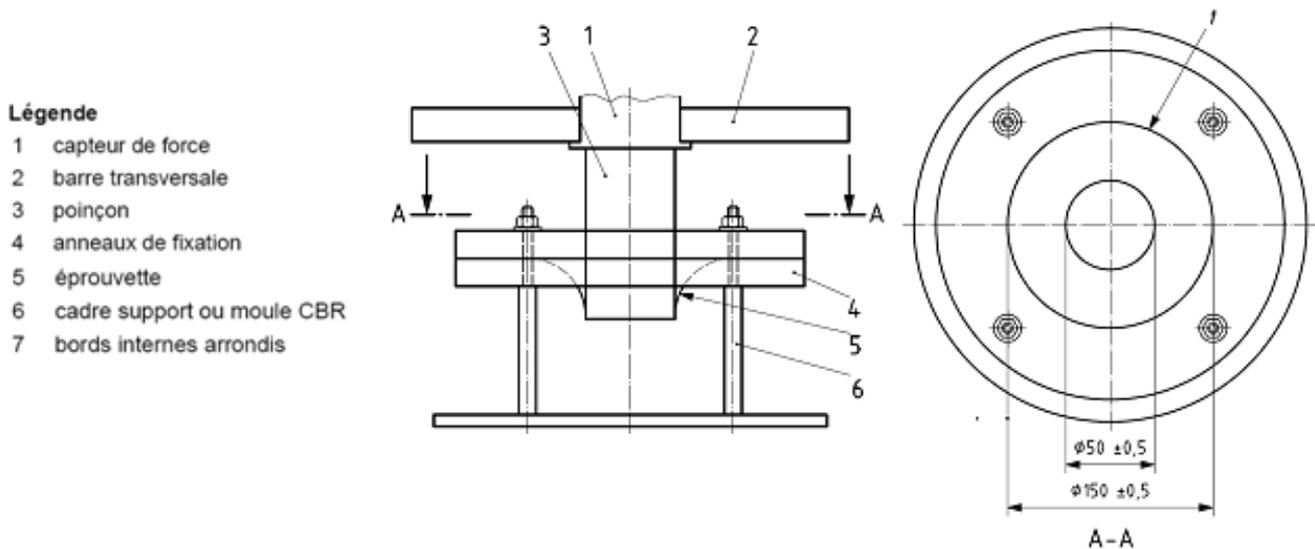


Figure 10: Appareillage de l'essai de poinçonnement CBR (AFNOR, 2006c)

✓ **Norme NF EN ISO 13433 : « Essai de perforation dynamique (essai par chute d'un cône) »**

L'essai de poinçonnement par chute d'un cône est un essai de poinçonnement dynamique applicable à l'ensemble des géosynthétiques et qui intervient dans le marquage CE ainsi que dans la certification ASQUAL des géotextiles. L'éprouvette est maintenue horizontalement entre deux anneaux en acier. Un cône en acier inoxydable de 1000 g est lâché en chute libre, pointe en avant, d'une hauteur de 500 mm sur le centre de l'éprouvette. Le degré de pénétration est mesuré par l'insertion dans le trou d'un cône effilé gradué

La figure 11 montre l'appareillage nécessaire à la réalisation de l'essai. La mesure du degré de pénétration se fait ensuite par insertion, dans le trou formé par le cône, d'un cône gradué. La valeur caractéristique d'un produit est définie comme le diamètre moyen, calculé sur la base de 5 essais.

Le degré de pénétration peut constituer une indication sur le comportement du géosynthétique lors de la chute de pierres anguleuses sur sa surface, il peut également fournir des caractéristiques du comportement d'un géosynthétique aux sollicitations dynamiques (AFNOR, 2007).

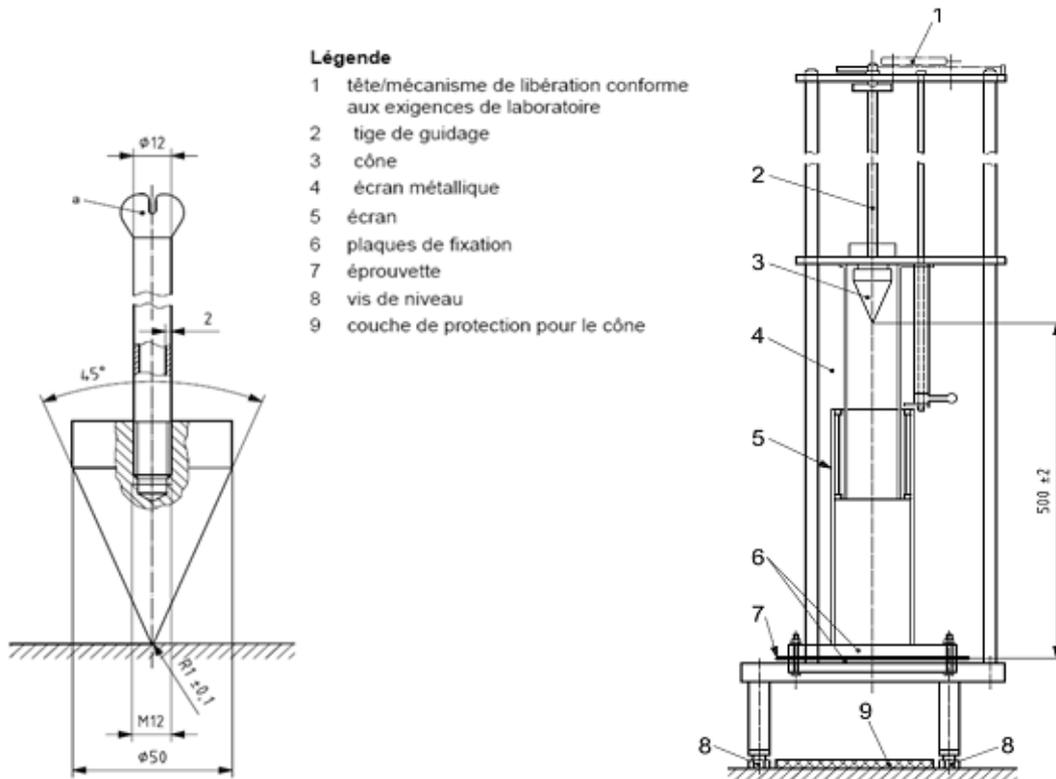


Figure 11: Appareillage de l'essai de poinçonnement par chute de cône (AFNOR, 2007)

- ✓ **Norme ASTM D4833 : « Méthode d'essai standard pour la résistance à la perforation Index de Géotextiles, Géomembranes et Produits Composés (Standard Test Method for Index Puncture Resistance of. Geotextiles, Geomembranes and Related Products) »**

L'essai ASTM D4833 est quasiment identique à l'essai français (NF P84-507) de détermination de la résistance au poinçonnement statique sans support dans la mesure où le poinçon et le support sont identiques.

Quelques différences subsistent cependant entre les deux essais notamment la vitesse de réalisation, le nombre d'éprouvettes testées et les valeurs mesurées. De plus, l'essai américain peut s'effectuer sur certains géotextiles (ASTM, 2007).

- ✓ **Norme ASTM D5494 : « Méthode d'essai standard pour la détermination de la résistance à la perforation pyramidale des Géomembranes non protégés et protégés (Standard Test Method for the Determination of Pyramid Puncture Resistance of Unprotected and Protected Geomembranes) »**

L'essai de détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal selon la norme ASTM s'applique aussi bien aux géomembranes non protégées qu'aux géomembranes avec un géotextile de protection. Il permet donc de déterminer la résistance au poinçonnement pyramidal des géomembranes, mais aussi la mesure de résistance supplémentaire apportée par le géotextile de protection.

Il est en grande partie similaire à l'essai européen NF EN 14574. Il faut tout de même noter que les poinçons utilisés dans ces deux essais ne sont pas tout à fait identiques (les formes sont similaires mais les dimensions ne le sont pas) (ASTM, 2006a).

Cet essai comporte lui aussi deux parties, à savoir une partie pour l'essai sur support rigide, et une autre pour celui sur support souple.

L'essai sur support rigide est réalisé exactement de la même manière que dans la norme européenne. En revanche, l'essai sur support souple fait intervenir un appareillage différent car le support souple est matérialisé par de l'eau (contenue dans un moule cylindrique). Cet essai est équivalent à un essai de poinçonnement sans support car l'eau ne doit pas être confinée pendant l'essai. Celle-ci sert uniquement à la détection du percement de la géomembrane par un circuit électrique qui la relie au poinçon. L'échantillon de géomembrane ou de DEG est maintenu entre deux anneaux circulaires munis d'une ouverture de 50 mm de diamètre.

L'interprétation de cet essai est effectuée de manière identique à l'essai de poinçonnement pyramidal décrit dans la norme européenne, les valeurs mesurées étant la force maximale de poinçonnement exercée et la déformation à la rupture.

- ✓ **Norme ASTM D6241 : « Méthode d'essai standard pour la résistance à la perforation statique de Géotextiles et produits apparentés à l'aide d'un poinçon de 50 mm (Standard Test Method for the Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50-mm Probe) »**

L'essai de poinçonnement statique ASTM D6241 ressemble à l'essai de poinçonnement statique ou essai CBR mais ne s'applique qu'aux géotextiles et non à l'ensemble des géosynthétiques. De plus 10 échantillons doivent être testés pour l'essai ASTM alors que la norme ISO stipule que 5 éprouvettes sont suffisantes (ASTM, 2004).

2.2 Essais de performance

Les essais de performance, sont souvent longs et prennent en compte de nombreux paramètres. Ils sont donc moins reproductibles et plus difficiles à interpréter que les essais index.

Néanmoins, ces essais sont très intéressants car ils peuvent permettre, dans des conditions qui se rapprochent de la réalité, en phase de conception et ex situ, de déterminer le complexe géotextile – géomembrane nécessaire à la résistance vis-à-vis des endommagements mécaniques dus au poinçonnement.

✓ Norme NF P84-506 : « Détermination de la résistance au poinçonnement dynamique »

Cet essai permet de mesurer la résistance au poinçonnement dynamique d'un DEG, placé sur un support rigide (béton, acier de forte épaisseur), lorsqu'il est soumis à des chocs provenant d'objets rigides présentant des arêtes vives. L'appareillage (figure 12) se compose d'un corps de poinçonnement qui vient chuter sur l'échantillon à tester.

L'énergie reçue par l'éprouvette est donnée par l'équation 1 :

$$E = m.g.h, \text{ en Joules} \quad (1)$$

Avec m : masse du corps de poinçonnement (en g) ;
 g : accélération de la pesanteur (en $m.s^{-2}$) ;
 h : hauteur de chute (en m).

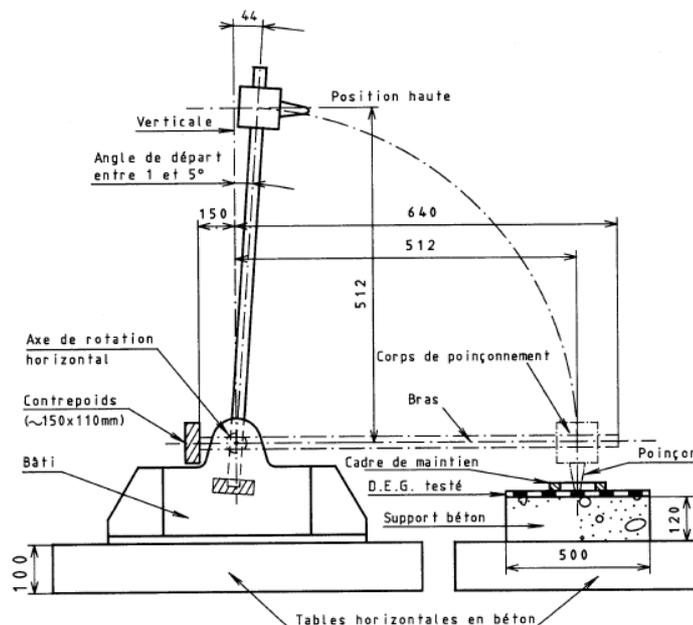


Figure 12 : Appareillage nécessaire à la détermination de la résistance au poinçonnement dynamique (AFNOR, 1992)

Pour déterminer la résistance du DEG, on effectue quelques essais préliminaires pour situer le niveau d'énergie à partir duquel on commence à observer quelques perforations de la structure d'étanchéité sur une série de 20 impacts. L'essai est ensuite réglé afin d'obtenir une énergie de 0,75 Joules inférieur à ce niveau.

Par valeur croissante d'énergie de 0,25 J, on détermine l'énergie, qui conduit, pour une série de 20 impacts à un maximum de 4 perforations. La résistance au poinçonnement dynamique du complexe est égale à la valeur de l'énergie la plus élevée qui entraîne 4 perforations au maximum.

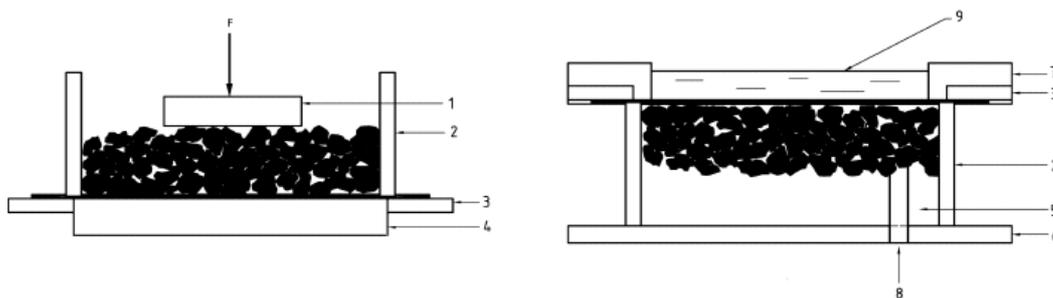
Le contrôle de la perforation se fait visuellement et au moyen d'un dispositif de vides pour les perforations non visibles.

Cet essai permet de modéliser certaines agressions dynamiques pouvant survenir sur chantier ou site, comme la chute de blocs, d'outils, de cailloux lors de la pose ou du remblaiement (AFNOR, 1992).

✓ **Norme NF P84-510 : « Détermination de la résistance au percement par granulats sur support rigide »**

L'objectif de cet essai est de déterminer la contrainte de poinçonnement en dessous de laquelle un DEG en contact avec une couche de granulat reste étanche. Cet essai consiste donc à soumettre à un poinçonnement granulaire statique un échantillon de DEG placé sur un support rigide. L'effort de percement mesuré correspond à l'effort appliqué sur la surface d'un pied presseur de 90 mm de diamètre. L'étanchéité de l'ensemble est alors testée dans une cellule sous faible pression d'air pendant 30 minutes.

L'appareillage, présenté en figure 13, est composé d'un support de poinçonnement constitué d'une plaque d'acier, d'une cellule de 152 mm, et d'un matériau granulaire de caractéristiques précises. Il pourra être réutilisé dans le cas des géomembranes en PEHD (AFNOR, 2002).



Légende

- | | | |
|--------------------------|------------------------|-------|
| 1 Pied presseur | 5 Mousse de polyester | 9 Eau |
| 2 Cellule de confinement | 6 Base de la cellule | |
| 3 Couronne de maintien | 7 Hausse de la cellule | |
| 4 Support rigide | 8 Pression d'air | |

Figure 13 : Appareillage nécessaire à la détermination de la résistance au percement par granulats sur support rigide. (AFNOR, 2002)

✓ **Norme NF EN 13719 : « Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles en contact avec les barrières géosynthétiques »**

C'est un essai conçu à l'origine en Allemagne sur lequel plusieurs améliorations ont été apportées. Il consiste à appliquer une charge au moyen de granulats factices normalisés (billes d'acier) sur une éprouvette de géotextile reposant sur un support souple en élastomère. L'efficacité du géotextile de protection est ensuite évaluée à partir de la mesure des déformations locales d'une feuille de plomb placée sous celui-ci. Cet essai cherche à simuler les sollicitations sur un DEG dues aux contraintes de service à long terme. La figure 14 montre l'appareillage de cet essai

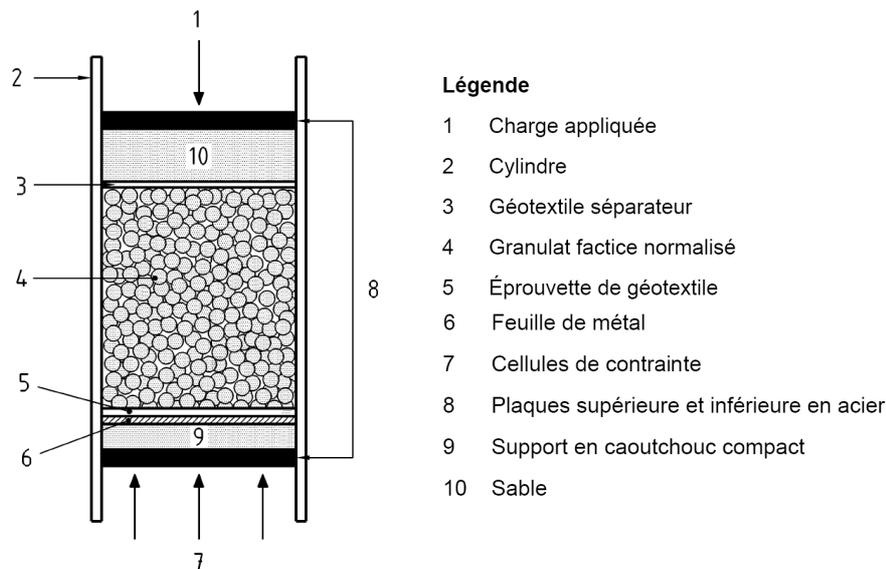


Figure 14 : Appareillage pour l'essai de détermination de l'efficacité de protection des géotextiles (AFNOR, 2003)

L'essai consiste alors à appliquer pendant une durée de 100 heures des contraintes de 300, 600 et 1200 kPa sur des échantillons différents. Il s'agit ensuite d'inspecter visuellement le géotextile afin de repérer toute détérioration significative et de mesurer la déformation moyenne des 3 empreintes les plus marquées selon deux axes perpendiculaires (AFNOR, 2003).

Cet essai comporte 2 parties :

- une partie dans laquelle on cherche à quantifier l'efficacité de protection du géotextile seul, sans la géomembrane ;
- une annexe (informative) dans laquelle il est possible de pratiquer un essai de performance avec les matériaux qui constitueront le futur DEG, y compris la géomembrane.

- ✓ **Norme ASTM D5514 : « Méthode d'essai standard pour les Essais de perforation hydrostatique à grande échelle des géosynthétiques (Standard Test Method for Large Scale Hydrostatic Puncture Testing of Geosynthetics)»**

Cet essai de poinçonnement hydrostatique s'applique aux géomembranes et aux DEG. Il cherche à reproduire les sollicitations appliquées à une géomembrane par une protubérance isolée, reposant entre la géomembrane et la couche de forme. Il consiste à appliquer une pression hydrostatique à un échantillon de géosynthétique supporté par une base qui diffère suivant la procédure de l'essai.

L'essai de poinçonnement hydrostatique regroupe trois procédures différentes, à savoir une procédure (A) utilisant des cônes ou des pyramides contre lesquels va venir se poinçonner la géomembrane et deux procédures (B et C), moins utilisées, nécessitant à la place des éléments poinçonnant les matériaux du site.

La procédure A utilise l'appareillage en figure 15. Il se compose d'une cuve de mise en pression d'un diamètre minimum de 500 mm, d'un système de détection de fuite et d'un lit de sable lavé qui prend place entre les cônes tronqués et contre lequel va venir s'appuyer la géomembrane lors de sa déformation. Une fois les matériaux et les éprouvettes de géomembrane et de géotextile mis en place, l'essai consiste à augmenter la pression de 7 kPa toutes les 30 minutes jusqu'à rupture de l'éprouvette. Si la perforation de la géomembrane ne se produit pas, il s'agit alors de recommencer l'essai en enlevant du sable et ainsi adopter une hauteur de cône plus importante. La hauteur de cône critique est définie comme étant la hauteur maximale qui n'entraîne pas de perforation dans la géomembrane pour une pression et une durée d'application données.

La cuve est remplie d'eau mais l'augmentation de la pression se fait par introduction d'air.

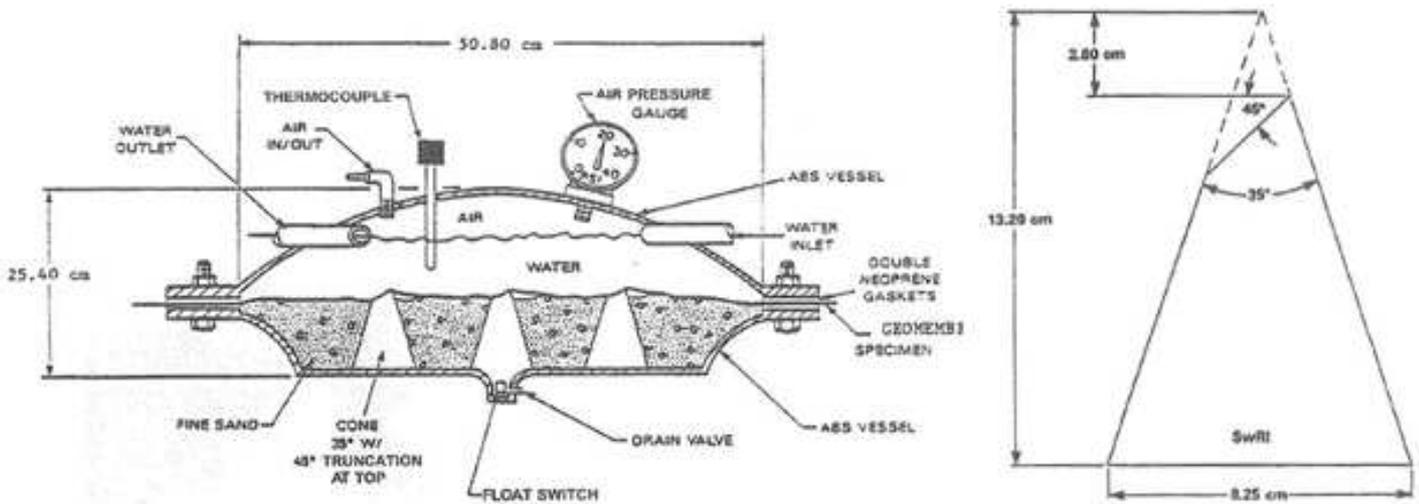


Figure 15 : Appareillage de l'essai de poinçonnement hydrostatique et géométrie des cônes (Laine et al., 1988)

L'évaluation de l'efficacité du complexe géosynthétique testé se fait par une inspection visuelle de la géomembrane à la recherche de perforations ou de déformations permanentes. De plus une mesure (immédiatement à la fin de l'essai et 90 minutes après) de l'épaisseur résiduelle de la géomembrane au niveau de ces défauts permet le calcul de la déformation et d'un indice de réversibilité des déformations (ASTM, 2006b).

✓ **Norme XP P84-523 : « Détermination de la résistance au poinçonnement sous charge hydrostatique » (AFNOR, 2008b)**

Le but de cet essai est de déterminer la pression hydrostatique nécessaire au percement d'un DEG posé sur support poinçonnant. Un granulat type est défini mais l'essai peut être réalisé avec tout autre support poinçonnant dans le cadre d'essais de performance.

L'augmentation de la pression se fait à vitesse constante (de l'ordre de 50 kPa/min) ou par palier successifs (de 50 kPa) jusqu'à ce qu'une fuite soit détectée ; on détermine ainsi la valeur caractéristique de l'échantillon. Dans le cas de perforations importantes, la fuite est détectée suite à une chute brutale de la pression qui ne peut être compensée par le système de régulation, facilitant la mesure de la pression de rupture. En revanche, lorsque les poinçonnements sont faibles, la chute de pression est rapidement compensée et la détection ne peut se faire que par constatation visuelle de la fuite lorsque l'eau commence à couler par l'exutoire de la cuve. Dans le cas où la rupture de l'échantillon ne survient pas, il est toujours possible de caractériser l'endommagement de la géomembrane à partir d'un essai de traction biaxiale ou sur bandes larges. La figure 16 montre l'appareillage utilisé pour l'essai.

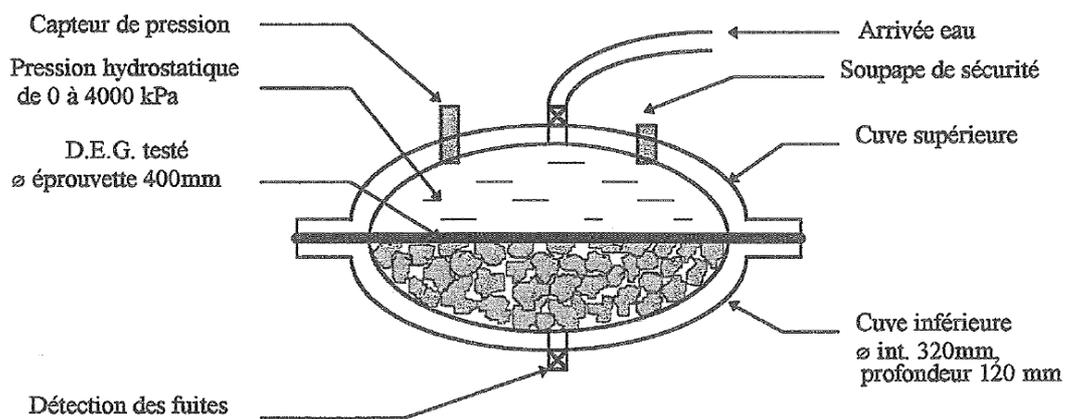


Figure 16 : Appareillage de l'essai de poinçonnement hydrostatique (AFNOR, 2008b)

✓ **Non normalisé : « Essai d'endommagement statique »**

Cet essai développé par le Cemagref d'Antony s'applique aux géomembranes et aux DEG. Il a pour objectif d'étudier l'efficacité d'un géotextile pour la protection d'une géomembrane dans les conditions de service sous l'effet du poids des déchets.

Le complexe géosynthétique peut être placé sur différents supports rigide ou déformable pour se rapprocher du comportement des argiles que l'on retrouve in situ et est soumis à une charge statique équivalente à la hauteur de déchets considérée.

L'appareillage est composé d'une presse de plusieurs tonnes, d'un support inférieur en acier de 1 m de diamètre, d'une protection périphérique et d'une plaque en acier supérieure, de 0,5 m de diamètre destinée à uniformiser l'application de la contrainte mécanique.

Comme on peut le voir sur les figures 17 et 18, environ 150 kg de granulats roulés ou concassés de calibre 20/40 et non normalisés représentant la couche drainante souhaitée, sont disposés en talus entre les 2 plaques en acier sur une hauteur de 0,3 m, ceci afin d'éviter les effets de bords qui pourraient perturber la contrainte verticale appliquée.

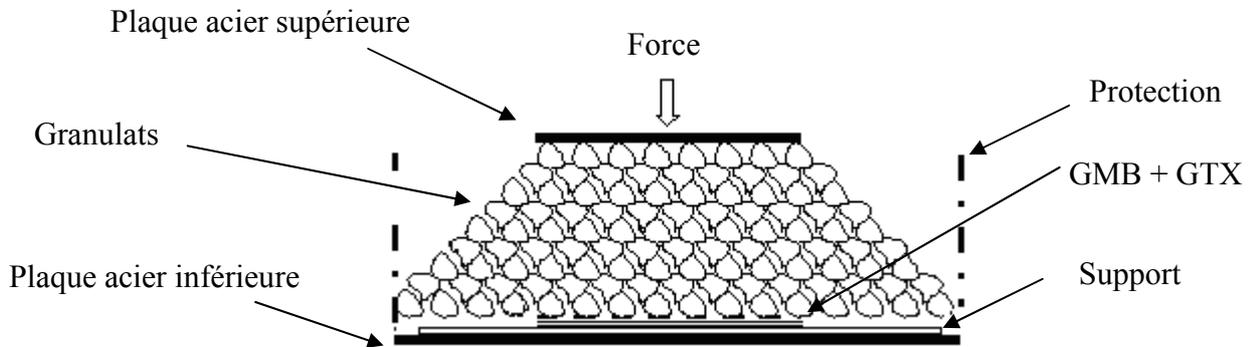


Figure 17 : Schéma de l'appareillage de l'essai d'endommagement statique (Budka et al., 2007)



Figure 18 : Appareillage de l'essai d'endommagement statique utilisé au laboratoire du Cemagref d'Antony

La durée d'application de la charge s'appuie sur l'annexe B de la norme NF EN 13719 (AFNOR, 2003) relative à la « Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles » et sur les travaux de Reddy et Saichek (1998). Une durée de 100 heures a été

jugée suffisante pour obtenir une simulation significative des sollicitations de service (Budka et al., 2007).

La procédure de caractérisation de l'endommagement de la géomembrane est à la fois visuelle et basée sur l'exploitation des résultats de l'essai de traction bi-axiale (essai éclatométrique).

On pourrait utiliser des sols réels pour le support, mais compte tenu des dimensions importantes de l'appareillage, il aurait été difficile d'assurer l'homogénéité de la couche support en argile. Il a donc été décidé d'utiliser des matériaux industriels et ainsi avoir une meilleure reproductibilité de l'essai (Guéret, 2009).

Le support retenu pour les essais est en polychloroprène dense (commercialisé sous la référence: Néo 50 Sh) de 0,95 m de diamètre, 25 mm d'épaisseur avec une dureté Shore A de 50. Ce produit présente une densité de 1,40, une résistance à la rupture en traction supérieure à 6 MPa et un allongement à la rupture supérieur à 250 % (Guéret, 2009).

Les conditions aux limites de l'appareillage avec une contrainte latérale nulle et des frottements entre les granulats et la plaque d'acier supérieure ne permettent pas de redistribuer uniformément la contrainte sur l'échantillon.

Il se produit alors, de manière identique à une éprouvette de béton en compression, un cône de contrainte amplifié et non homogène vers le centre de l'éprouvette.

Guéret (2009) a mis au point avec une cellule de pression totale des droites d'extrapolations linéaire permettant d'évaluer la contrainte effective sur le complexe géosynthétique en fonction de la contrainte appliquée sur la couche granulaire.

Dans les ISD françaises la géomembrane supporte, une structure de drainage (0,50 m de granulats soit environ 10 kPa) surmonté de couches de déchets **pouvant** atteindre 30 m (300 kPa) voir plus dans certains cas et d'une couverture d'environ un mètre d'épaisseur. Si l'on se munit d'un coefficient de sécurité fixée par rapport à la norme NF EN 13719 (AFNOR, 2003), de 1,67 (=2,5/1,5, sans considérer de coefficient de sécurité sur la contrainte mécanique) destiné à prendre en compte l'influence de la température (23°C au lieu de 40°C) et de la durée de l'essai (100 heures au lieu de 1000 heures), il nous faudrait alors appliquer environ 530 kPa sur le complexe géosynthétique.

Pour les obtenir, il nous suffit alors d'après Guéret (2009) d'avoir une contrainte de 300 kPa sur la couche granulaire, soit une force de 55 KN

✓ **Non normalisé : « Essais Damaging Cylinder »**

Cet essai a également été développé par le Cemagref d'Antony et s'applique aux géomembranes, aux géotextiles et aux DEG. Il a pour objectif de se rapprocher au plus près des conditions réelles de poinçonnement en mettant en place un essai simple et facile à réaliser.

Le dispositif est constitué d'un moule CBR et surmonté d'un dispositif de serrage de l'échantillon (voir figure 19). Ce dispositif permet entre autres d'utiliser une éprouvette suffisamment grande pour vérifier son endommagement à l'essai de traction bi-axiale.

Un poinçon métallique de 8 mm de diamètre identique à celui utilisé dans l'essai NF P84-507 décrit en 2.1 est enfoncé à vitesse constante dans le complexe géosynthétique, reposant sur un support en argile ou synthétique.

On peut mesurer aussi bien l'enfoncement engendré par une force donnée que la force nécessaire pour atteindre un enfoncement donné.

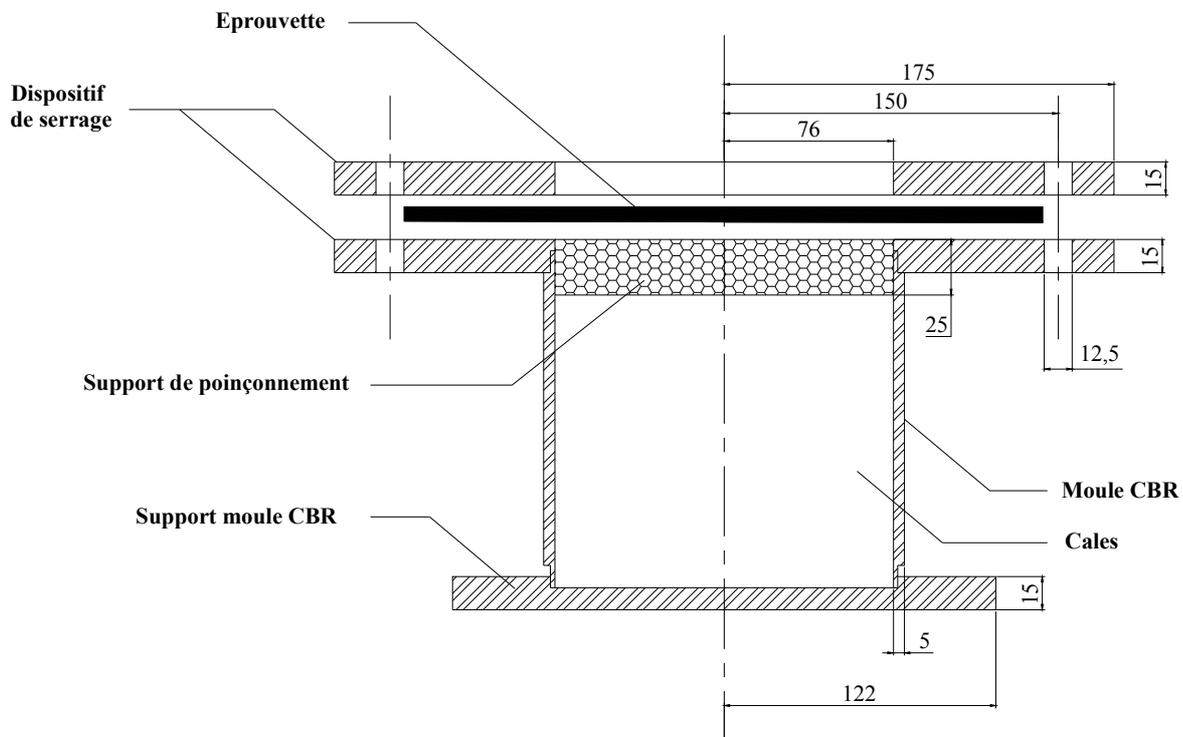


Figure 19 : Appareillage de l'essai DC (Guéret, 2009)

Pour représenter la force exercée par un granulat en ISD française, Guéret (2009) a montré que l'application d'une force de 1 kN, lors des essais de poinçonnement paraît judicieuse.

2.3 Synthèse

Les essais de poinçonnement sur les DEG ou un de leurs matériaux constitutifs sont nombreux et très différents les uns des autres. Il peut alors être intéressant d'énoncer les avantages et inconvénients de chacun pour une utilisation en dimensionnement d'un DEG en ISD.

Dans le tableau 2 qui compare les essais présentés en 2.1 et 2.2 on retrouve également le type de géosynthétiques sur lesquels s'exercent l'essai et les valeurs qui y sont mesurés.

On remarque donc que l'essai DC et l'essai d'endommagement statique semblent être ceux qui simulent le mieux les sollicitations rencontrées dans les ISD françaises.

Comparaisons des principaux essais sur DEG en ISD							
Désignation de l'essai	Type d'essai	Normes		Applicable sur	Valeurs mesurées	Les +	Les -
Détermination de la résistance au poinçonnement statique des géomembranes et des dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) - Cas du poinçon cylindrique de petit diamètre (8mm) sans support	Index	AFNOR	NF P84-507	DEG, GMB	Force de perforation Enfoncement correspondant	Rapide Simple Reproductible Piston de petit diamètre fidèle aux agressions	Portance du sol négligée → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations
Détermination de la résistance au poinçonnement	Index	AFNOR	NF G38-019	GTX	Force de perforation Enfoncement correspondant	Rapide Simple Reproductible Extrémité du piston fidèle aux agressions par granulats saillants	Portance du sol négligée → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations
Détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal de géosynthétiques sur support	Index	AFNOR	NF EN 14574	DEG, GTX	Force de perforation	Rapide Simple	Support rigide trop sévère Le poinçon s'émousse rapidement sur le support rigide
					Force de perforation Déformation à la rupture	Reproductible Extrémité du piston fidèle aux agressions par granulats saillants	Mousse polyuréthane trop déformable → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations
Essai de poinçonnement statique (essai CBR)	Index	AFNOR	NF EN ISO 12236	GSY	Force de perforation	Rapide	Portance du sol négligée → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations Poinçon large → rupture due aux contraintes de traction se développant entre le bord du poinçon et l'anneau en acier
					Enfoncement correspondant	Simple Reproductible	
Méthode d'essai standard pour la résistance à la perforation Index de Géotextiles, Géomembranes et Produits Composés	Index	ASTM	D4833	DEG, GMB, GTX	Force de perforation Enfoncement correspondant non pris en compte	Rapide Simple Reproductible Piston de petit diamètre fidèle aux agressions	Portance du sol négligée → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations Vitesse d'enfoncement du piston trop rapide ne permettant pas au produit de se relaxer (300 mm/min)
Méthode d'essai standard pour la détermination de la résistance à la perforation pyramidale des Géomembranes non protégés et protégés	Index	ASTM	D5494	DEG, GMB	Force de perforation	Rapide Simple	Support rigide trop sévère Le poinçon s'émousse rapidement sur le support rigide
					Force de perforation Déformation à la rupture	Reproductible Extrémité du piston fidèle aux agressions par granulats saillants	Portance du sol négligée → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations
Méthode d'essai standard pour la résistance à la perforation statique de Géotextiles et produits apparentés à l'aide d'un poinçon de 50 mm	Index	ASTM	D6241	GTX	Force de perforation Enfoncement correspondant	Rapide Simple Reproductible	Portance du sol négligée → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations Poinçon large → rupture due aux contraintes de traction se développant entre le bord du poinçon et l'anneau en acier
Essai de perforation dynamique (essai par chute d'un cône)	Index	AFNOR	NF EN ISO 13433	GSY	Diamètre moyen de pénétration du cône	Rapide Simple Reproductible	Portance du sol négligée → grande déformation donc pas représentatif des sollicitations Lecture du degré de pénétration du cône délicate
Détermination de la résistance au poinçonnement dynamique	Performance	AFNOR	NF P84-506	DEG	Energie max supportée sans perforation	Simple Reproductible	Support rigide trop sévère On ne donne pas une valeur de résistance mais on vérifie seulement que l'on est supérieure à un seuil donné
Détermination de la résistance au percement par granulats sur support rigide	Performance	AFNOR	NF P84-510	DEG	Effort maximum exercé sans qu'il n'y ai de fuite du DEG	Simple	Long Support rigide trop sévère On ne donne pas un effort de percement mais on vérifie seulement que l'on est dans un intervalle donné Détermination du nombre de fuites et non des percements → très orienté GMB bitumineuses Utilisation de granulats non représentatifs de ceux rencontrés in situ Conditions aux limites sur les bords non réalistes

Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles en contact avec les barrières géosynthétiques	Performance	AFNOR	NF EN 13719	DEG, GTX	Déformations locales	Possibilité d'utiliser des granulats du terrain Bonne connaissance de la contrainte réellement appliquée Prend en compte les effets à long terme	Long Lecture des déformations difficile
Méthode d'essai standard pour la résistance à la perforation statique de Géotextiles et produits apparentés à l'aide d'un poinçon de 50 mm	Performance	ASTM	D5514	DEG, GMB	Pression de percement	Reproductible (position des cônes définie) Peut représenter des agressions venants de la couche support	Poinçonnement difficile avec les matériaux élastiques
Détermination de la résistance au poinçonnement sous charge hydrostatique	Performance	AFNOR	XP P84-523	DEG, GMB	Pression de percement	Possibilité d'utiliser des granulats du terrain → Possibilité d'utiliser un sol support rencontré in situ →	On se limite au cas d'une couche granulaire sur un sol très déformable On se limite au cas d'une pression hydrostatique sur sol support comportant des aspérités Détection des fuites difficile
Endommagement statique	Performance			DEG, GMB	Endommagement de la GMB Déformations locales	Utilisation des granulats du terrain Conditions aux limites sur les bords réalistes Prend en compte les effets à long terme Possibilité de vérification des déformations locales à la feuille de plomb Possibilité de vérification de l'endommagement à l'essai d'éclatométrie	Long Mauvaise connaissance de la contrainte réellement appliquée Difficilement reproductible
Damaging Cylinder	Performance			DEG, GMB	Endommagement de la GMB Enfoncement correspondant	Rapide Simple Reproductible Portance du sol non négligée Piston de petit diamètre fidèle aux agressions Possibilité de vérification de l'endommagement à l'essai d'éclatométrie	Ne prend pas en compte les effets à long terme Piston moins réaliste que des granulats La contrainte à appliquer par le piston n'est pas bien définie

Tableau 2 : Comparaison des principaux essais sur DEG en ISD

3 Caractérisation de l'endommagement

Certains essais de performances ne donnent pas de valeurs numériques pour caractériser la protection apportée par le géotextile (pression de percement, énergie maximale supportée sans perforation, ...) mais seulement une évaluation de l'endommagement subit par la géomembrane. Pour cela, on peut procéder à un examen visuel, à un examen au profilomètre, ou réaliser un essai de traction bi-axial.

3.1 Observations visuelles

L'examen visuel est celui qui est le plus facile à réaliser. Les défauts entraînant un transfert advectif entre les deux faces de la géomembrane sont comparés aux différents types d'endommagements définis dans le guide pour la réalisation et l'exploitation de planches d'essais sur DEG (CFG, 2001). On retrouve :

- les « éraflures » : rayure de surface ;
- les « entailles » : rayure en profondeur sans percement ;
- les « indentations » : poinçonnement ponctuel rémanent et sans perforation, avec réduction d'épaisseur importante, correspondant généralement à l'empreinte d'un granulat ;
- les « déformations » : déformation de la géomembrane du fait d'un tassement du sol support ; (du fait d'un tassement ou d'un défaut initial de planéité ou de continuité) ou de la proéminence d'un élément grossier, rémanente ou non et sans réduction notable de l'épaisseur (voir figure 20) ;
- les « percements » : trou ou déchirure.

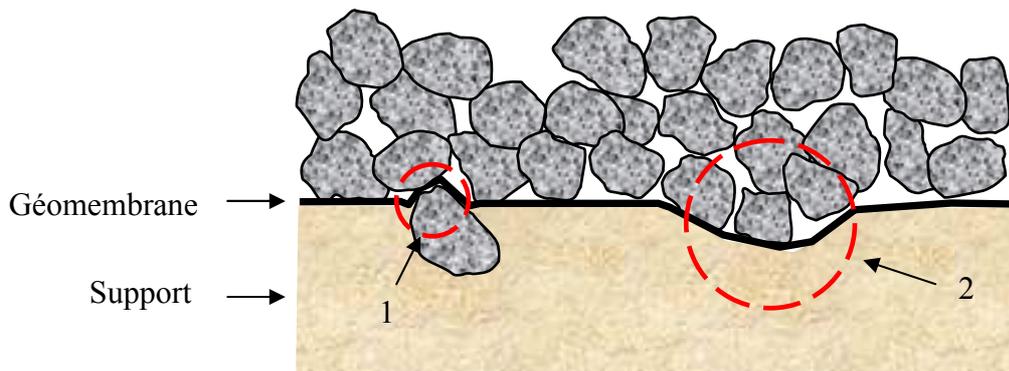


Figure 20 : représentation schématique d'endommagements de type 'déformation' – Déformation due (1) à un élément proéminent et (2) à un défaut de planéité du support observé après démontage (CFG, 2001).

Le percement est le défaut absolu. Les autres sont classés selon leur importance (A = dommage mineur, B et C = dommage non acceptables).

3.2 Observations au profilomètre

Il s'agit de mesurer les caractéristiques géométriques des déformations ou d'indentations rémanentes sur une géomembrane à l'aide d'un profilomètre laser ou mécanique.

On mesure ainsi la longueur de la zone déformée (en plan) pour ainsi déduire une évaluation du pourcentage de déformation que subit la géomembrane au droit de ce défaut.

3.3 Essai de traction bi-axiale

L'essai de traction bi-axiale XP P84-503 (AFNOR, 2008c), souvent appelé essai d'éclatométrie, peut permettre de caractériser l'importance d'un défaut de type A, B ou C afin de pouvoir confirmer le classement établi lors de l'observation visuelle des échantillons de géomembrane.

Cet essai consiste à appliquer une pression sous une éprouvette de géomembrane de forme circulaire (figures 21 et 22).

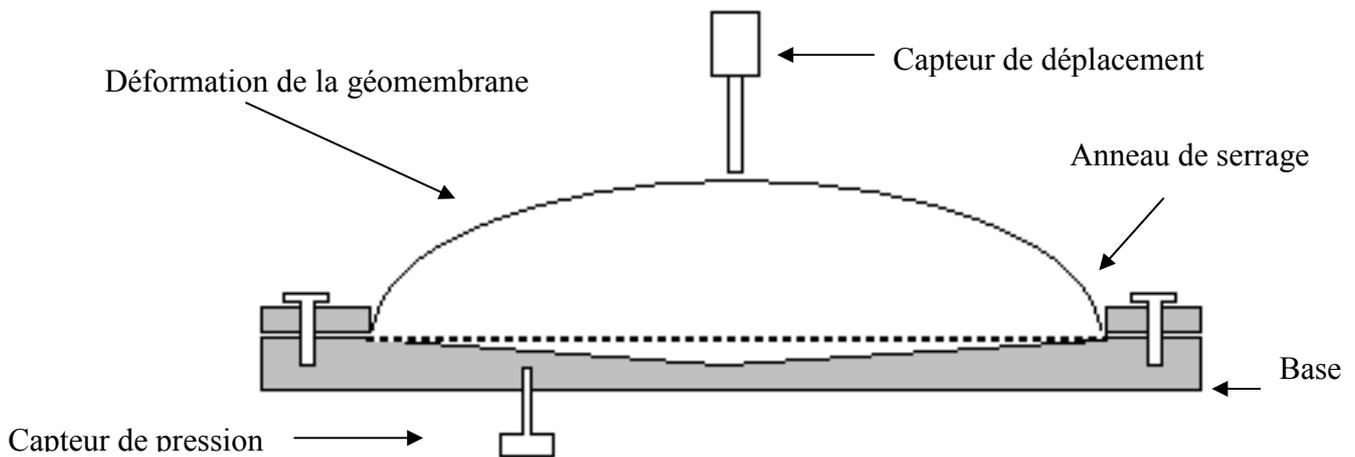


Figure 21 : Schéma de principe de l'essai de traction bi-axiale



Figure 22 : Appareillage utilisé pour les essais de traction bi-axiale

Cette pression déforme la géomembrane et crée, au centre de la déformée, une contrainte isotrope dans le plan tangent de la géomembrane. Lors de cet essai, on mesure la déflexion du centre de l'éprouvette (à l'aide d'un laser) et la pression sous la géomembrane. Ces deux mesures permettent de calculer les valeurs de déformation et de contrainte, en se basant notamment sur les hypothèses simplificatrices suivantes : déformation sphérique et uniforme dans le sens méridien de la géomembrane durant tout l'essai, homogénéité et incompressibilité de la géomembrane et champ de contrainte constant dans son épaisseur.

Un détail du calcul de ces valeurs figure en annexe 1.

L'appareillage utilisé dans ce travail a un diamètre de 0,2 m. La pression est augmentée de telle sorte que le taux de déformation de l'éprouvette soit constant et égal à 5% par minute

L'essai est conduit jusqu'à obtention de la rupture, c'est-à-dire environ 160 % pour une géomembrane en PEHD.

Il faut savoir qu'un défaut est considéré inacceptable s'il entraîne une perte supérieure à 25 % de la déformation à rupture de la géomembrane. Ce critère a été établi d'après la norme NF EN 13493 intitulée « Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des ouvrages de stockage et d'enfouissement de déchets solides » relative aux géomembranes, dans laquelle il est précisé qu'en terme de durabilité, le niveau d'acceptabilité correspond à une modification n'excédant pas 25% par rapport aux valeurs initiales de la résistance et de la déformation à rupture en traction du matériau (AFNOR, 2006a).

La caractéristique retenue pour évaluer l'importance d'un défaut est la déformation à la rupture, car elle permet la meilleure différenciation des effets des dommages testés.

Un exemple de résultats respectant la méthodologie ci-dessus est illustré figure23.

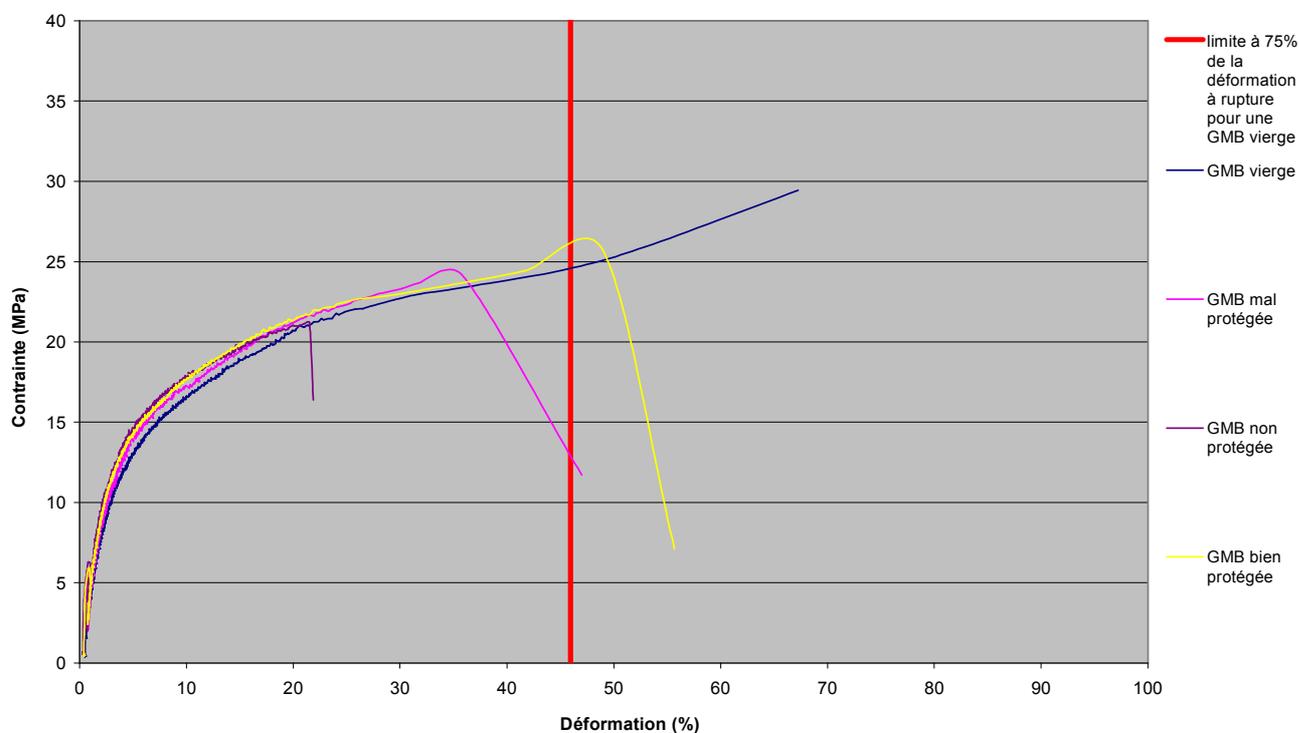


Figure 23 : Exemples de résultats des essais de traction biaxiale sur géomembranes testées à l'essai d'endommagement statique

PARTIE II :

**RECOMMANDATION D'UN GEOTEXTILE DE PROTECTION POUR
DES SOLLICITATIONS DE SERVICE**

Cette seconde partie est consacrée à la présentation des recherches et expérimentations réalisées sur douze géotextiles de protection différents de même masse surfacique marchande (1000g/m^2), ainsi qu'à leur interprétation dans le cadre de ce stage.

L'objectif de cette partie est d'évaluer la faisabilité d'une corrélation entre la protection contre l'endommagement des géomembranes et d'autres caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles que leur seule masse surfacique, seule caractéristique utilisée à ce jour dans les différentes méthodes de dimensionnement.

1 Présentation de l'étude

A l'heure actuelle, il existe plusieurs méthodes et recommandations de dimensionnement des géotextiles de protection de la géomembrane. On peut citer par exemple celles développées par Koerner (Narejo et al. 1996), Fayoux (Fayoux et Pignon, 1990), Artières et Duquennoy (1997), etc. Même certains fabricants comme Geofabrics (2005), Fibertex (Fibertex, s.d.) ou encore Bidim (1999) proposent leur propre méthode.

Une synthèse de toutes ces méthodes de dimensionnement figurant en annexe 2, issue des travaux d'Aufrère (2008), montre qu'elles ne sont pas vraiment dédiées aux ISD. On se retrouve alors avec des méthodes de type empirique basées par exemple sur l'essai de poinçonnement hydrostatique ATSM D5514, qui comme on peut le voir dans le tableau 2 n'est pas le plus représentatif.

C'est pour cela qu'elles donnent toutes des résultats très différents. Ainsi, sous une hauteur de déchets de 30 m (soit un chargement de 300 kPa), avec une structure drainante en granulats de calibre 20/40 et une géomembrane PEHD de 2 mm d'épaisseur, ces différentes méthodes nous proposent des géotextiles de masse surfacique variant de 405 à 4200g/m^2 (Aufrère, 2008).

De plus, comme l'a montré une étude (Jones et al. 2000), plusieurs géotextiles de masse surfacique identique ne protégeaient pas de la même manière une géomembrane. Des paramètres tels que le type, la qualité de fibres utilisées et le mode de fabrication du géotextile influent donc sur l'efficacité de protection des géomembranes.

Il peut alors être intéressant d'utiliser d'autres caractéristiques pour le dimensionnement des géotextiles de protection que la seule masse surfacique.

Dans les travaux d'Aufrère (2008) et Guéret (2009), plusieurs géotextiles aiguilletés de masse surfacique comprise entre 500g/m^2 et 1400g/m^2 ont été testés en guise de protection de la géomembrane avec « l'essai d'endommagement statique ».

A l'issue de ces travaux les géotextiles de masse surfacique égale ou inférieure à 800g/m^2 ont été jugés peu efficaces dans la protection des géomembranes contre les endommagements causés par les granulats. Au contraire, les géotextiles de masse surfacique égale ou supérieure à 1200g/m^2 se sont révélés très efficaces et suffisamment protecteurs dans la grande majorité des cas. Dans le cas des géotextiles de masses surfaciques égales à 1000g/m^2 , la protection était variable.

C'est ainsi qu'il a été décidé dans le cadre de ce stage de réaliser des essais de performance sur une large gamme de géotextiles de 1000g/m^2 uniquement. Ces essais, nous permettent d'apprécier la qualité de protection d'un géotextile pour des sollicitations proche de celle rencontrées in situ. L'objectif de cette démarche est de pouvoir comparer le résultat de ces essais à d'autres caractéristiques physiques et mécaniques issus du marquage CE ou de la certification ASQUAL, et ne pas se cantonner à la seule masse surfacique.

Le premier intérêt d'utiliser les caractéristiques du marquage CE ou de la certification ASQUAL sont qu'elles mettent en œuvre des processus d'essais simple, à la portée de tout fabricant pour mettre au point leurs produits et de l'organisme de contrôle pour la réception

des produits lors des travaux. Le second est la disponibilité pour le projeteur des fiches techniques associées afin d'évaluer au cas par cas les bonnes associations de produits.

2 Caractéristiques physiques et mécaniques

2.1 Collecte des échantillons et des fiches techniques

La première partie de mon travail a été le recensement des géomembranes PEHD de 2 mm d'épaisseur et géotextiles non tissés aiguilletés en 1000 g/m² disponibles au laboratoire.

Suite à ça, j'ai établi une liste des coordonnées des principaux fabricants produisant ces matériaux avant de les contacter pour la fourniture d'échantillons. Je leur ai expliqué en quoi consistait mon travail et ils ont presque tous répondu favorablement. Après la réception des échantillons, j'ai réalisé un travail de recherche des fiches techniques correspondantes. Lorsque celle-ci n'était pas disponible sur internet où dans les catalogues, j'ai recontacté les fabricants pour me les faire parvenir.

Au total, j'ai réussi à réunir 11 géotextiles différents. Le tableau 3 récapitule les caractéristiques physiques présentes dans les fiches techniques ainsi que les caractéristiques mécaniques simulant une action élémentaire du poinçonnement. On donne également dans ce tableau une indication relativement à la certification ASQUAL du produit, ou si il est simplement marqué CE. Cette information permet de disposer d'une analyse critique sur la validation éventuelle par un laboratoire accrédité de la crédibilité des informations recueillies.

Afin de ne pas énoncer de marques, les géotextiles sont nommés selon une référence interne au laboratoire du Cemagref d'Antony.

Référence interne	Epaisseur (mm) EN ISO 9863-1	Perforation dynamique (mm) EN ISO 13433	Poinçonnement statique (kN) NF G38-019	Poinçonnement CBR (kN) EN ISO 12236	Résistance à la traction SP-ST (kN/m) EN ISO 10319	Déformation à l'effort de traction max. SP-ST (%) EN ISO 10319	Certification/marquage CE
09.002	7,5	0	6	11	65-65	90-90	ASQUAL/CE
09.020	6,5	2,5	6	10	65-65	50-55	ASQUAL/CE
10.004	7	2	3,6	10	34-75	90-60	CE
10.005	7	?	?	5,2	21-40	80-50	CE
10.006	7,2	6	5,6	9,6	55-55	105-100	CE
10.007	6,1	1	?	11	55-100	75-75	CE
10.008	7,5	0	6,5	12	65-80	85-85	ASQUAL/CE
10.011	6,3	0	4,8	10	45-66	85-70	CE
10.014	6,55	0	3,8	11,4	69-73	70-67	CE
10.017	7	4	3,7	5,1	20-48	150-95	CE
10.018	7,1	0	5	12	65-65	85-105	CE

Tableau 3 : Caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles en 1000g/m² utilisés

Le point d'interrogation "?" dans le tableau signifie que la valeur n'a pas été obtenue.

Les géomembranes utilisées sont en PEHD de 2 mm d'épaisseur ; leurs caractéristiques figurent dans les annexes 3 et 4.

Nous avons utilisé une seconde géomembranes (référence : 07.020) faute d'une quantité suffisante de la première (référence : 05.037).

La caractérisation de l'endommagement résultant d'une comparaison entre les caractéristiques d'un échantillon endommagé et celui de l'échantillon vierge correspondant, ce choix ne pose donc aucun problème.

2.2 Caractéristiques physiques et mécaniques complémentaires

2.2.1 Masse surfacique

La certification ASQUAL et le marquage CE autorisent une tolérance de 10% pour les valeurs annoncées de la masse surfacique, c'est-à-dire dans notre étude 1000 g/m².

Des mesures réelles ont donc été réalisées avec 10 éprouvettes prélevées sur toute une largeur du sens de production (de la façon décrite à la figure 24). On choisit pour cela de prendre une incertitude de 0,005 g pour la balance et +/- 1 cm² pour l'emporte pièce (figure 25) de diamètre 100 mm qui a servi à la découpe des échantillons afin d'effectuer le calcul avec une confiance à 95% (k=2). Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 4.

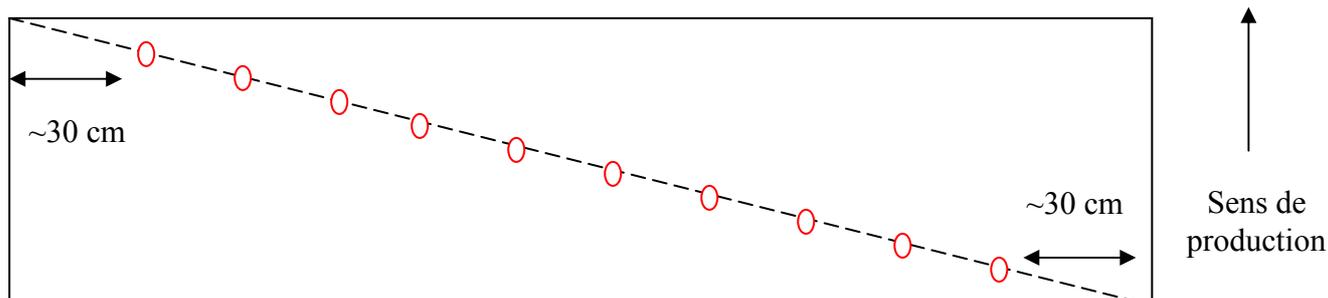


Figure 24 : Mode opératoire du prélèvement des éprouvettes pour la masse surfacique



Figure 25 : Découpe des échantillons

Le but de ces mesures est d'étudier l'homogénéité d'un géotextile et ainsi avoir une idée de sa qualité de production.

Pour cela, on trouve dans le tableau 4 la variation de la masse de chaque géotextile sur une largeur de rouleau. L'échelle choisit est de 1 g par ligne horizontale et reste la même pour chaque graphique.

On s'aperçoit alors que certains géotextiles en 1000 g/m² comme l'échantillon 09.020, sont très hétérogène et peuvent avoir une masse surfacique voisinant les 800 g/m² alors que ce grammage à été évalué insuffisant pour une protection de la géomembrane en ISD (Guéret, 2009).

Ref. GTX	N° de l'échantillon										Moyenne	Variation de la masse sur une largeur de production	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
09.002	7,929 g	7,977 g	8,015 g	7,889 g	7,852 g	7,484 g	7,919 g	7,939 g	7,764 g	8,058 g	1004	(+/- 18) g/m ² (k=2)	
09.020	8,629 g	9,111 g	6,632 g	7,237 g	9,175 g	6,820 g	7,090 g	6,295 g	7,640 g	8,889 g	0987	(+/- 89) g/m ² (k=2)	
10.004	8,181 g	7,995 g	7,525 g	7,825 g	8,053 g	7,737 g	7,601 g	7,819 g	7,736 g	7,823 g	0997	(+/- 21) g/m ² (k=2)	
10.005	7,775 g	7,432 g	7,259 g	7,800 g	7,790 g	8,200 g	7,628 g	7,442 g	8,099 g	7,932 g	0985	(+/- 27) g/m ² (k=2)	
10.006	8,792 g	7,316 g	9,119 g	8,404 g	8,217 g	8,232 g	7,210 g	7,314 g	7,809 g	7,247 g	1014	(+/- 57) g/m ² (k=2)	
10.007	7,412 g	7,692 g	8,432 g	7,880 g	7,551 g	8,277 g	7,500 g	7,343 g	6,992 g	7,367 g	0973	(+/- 38) g/m ² (k=2)	
10.008	7,197 g	6,986 g	7,411 g	6,800 g	7,099 g	6,999 g	7,852 g	7,906 g	6,923 g	6,926 g	0918	(+/- 34) g/m ² (k=2)	
10.011	8,372 g	8,535 g	8,360 g	8,350 g	8,310 g	8,694 g	8,290 g	8,996 g	8,216 g	8,369 g	1076	(+/- 23) g/m ² (k=2)	
10.014	8,050 g	8,202 g	8,337 g	7,577 g	6,698 g	7,752 g	8,885 g	8,603 g	8,157 g	8,542 g	1029	(+/- 52) g/m ² (k=2)	
10.017	7,856 g	7,422 g	6,820 g	7,229 g	7,847 g	7,682 g	7,910 g	7,600 g	7,840 g	8,029 g	0971	(+/- 32) g/m ² (k=2)	
10.018	8,078 g	7,873 g	7,781 g	7,818 g	8,559 g	7,675 g	7,703 g	8,085 g	7,395 g	7,805 g	1003	(+/- 28) g/m ² (k=2)	

Tableau 4 : Masses surfaciques mesurées au laboratoire

2.2.2 Poinçonnement statique NF P84-507

Nous possédons l'appareillage nécessaire à la réalisation de cet essai dans le laboratoire du Cemagref d'Antony (certifié COFRAC). Cet essai, facilement réalisable, rapide et reproductible, n'est pas directement dédié au géotextile mais il peut être intéressant de le réaliser afin d'apprécier une plus grande diversité de caractéristiques mécaniques.

Avec des incertitudes de 0,01 mm pour le bâti et 0,29 N pour le capteur de force (donnés fournis par l'équipe de métrologie), le tableau 5 présente les résultats avec un niveau de confiance à 95% ($k=2$). Pour chaque référence de géotextile, la première ligne désigne la force maximale supportée par l'échantillon (en N), la seconde ligne l'enfoncement correspondant (en mm) et la troisième la masse (en g).

Pour comparer les résultats obtenus au cours de cet essai avec les valeurs de la masse surfacique, les échantillons poinçonnés sont les même que ceux utilisés dans le paragraphe précédent. On pourrait déduire de la figure 26 que la résistance d'un géotextile croît de manière linéaire avec sa masse surfacique, mais on s'aperçoit que cette relation est propre à chaque produit. En effet les coefficients directeurs de chaque droite de régression linéaire sont totalement différents. On en déduit donc encore une fois que la résistance d'un géotextile n'est pas uniquement liée à sa masse surfacique mais aussi à sa composition et à son mode de fabrication (nature du polymère de base, longueur des fibres, procédé d'assemblage, ...).

Ref. GTX	N° de l'échantillon										Moyenne		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
09.002	2261,5	2190,8	2442,2	2449,8	2158,0	2200,7	2154,7	2330,2	2299,9	2284,1	2277,2	(+/- 76,4)	(k=2)
	20,33	19,67	21,33	20,33	19,67	19,67	20,00	19,33	18,67	21,67	20,07	(+/- 0,61)	(k=2)
	7,929	7,977	8,015	7,889	7,852	7,484	7,919	7,939	7,764	8,058	1004	(+/- 18)	(k=2)
09.020	2080,5	2027,7	1472,7	1899,1	2108,0	1770,8	1516,9	1458,0	1543,6	2062,0	1793,9	(+/- 173,9)	(k=2)
	29,002	25,335	24,003	24,001	23,001	24,002	24,003	23,668	24,002	25,668	24,67	(+/- 1,10)	(k=2)
10.004(8,629	9,111	6,632	7,237	9,175	6,820	7,090	6,295	7,640	8,889	0987	(+/- 89)	(k=2)
	2120,6	2376,4	2252,0	2338,8	2434,5	2492,3	2255,2	2314,8	2200,1	2323,9	2310,9	(+/- 73,8)	(k=2)
	20,33	20,33	18,67	24,67	24,33	20,67	27,34	26,00	23,33	22,00	22,77	(+/- 1,79)	(k=2)
10.005	8,181	7,995	7,525	7,825	8,053	7,737	7,601	7,819	7,736	7,823	0997	(+/- 21)	(k=2)
	1273,3	1154,3	1140,4	1039,7	1236,0	1271,6	1146,3	1134,1	1274,5	1228,3	1189,9	(+/- 50) N	(k=2)
	27,00	24,67	24,67	23,00	24,34	26,33	25,33	24,00	24,67	25,00	24,9	(+/- 0,75)	(k=2)
10.006	7,775	7,432	7,259	7,800	7,790	8,200	7,628	7,442	8,099	7,932	0985	(+/- 27)	(k=2)
	1540,4	1451,1	1581,6	1606,8	1490,0	1604,5	1467,1	1526,6	1606,8	1538,1	1541,3	(+/- 37,8)	(k=2)
	20,00	18,33	22,34	22,67	22,67	23,67	24,33	25,00	23,33	24,34	22,67	(+/- 1,33)	(k=2)
10.007	8,792	7,316	9,119	8,404	8,217	8,232	7,210	7,314	7,809	7,247	1014	(+/- 57)	(k=2)
	2140,0	2465,1	2586,4	2318,6	2162,9	2309,4	2391,8	2043,9	2368,9	2229,3	2301,6	(+/- 105,8)	(k=2)
	19,33	21,00	22,67	19,67	20,67	21,34	19,33	17,67	19,00	17,67	19,83	(+/- 1,03)	(k=2)
10.008	7,412	7,692	8,432	7,880	7,551	8,277	7,500	7,343	6,992	7,367	0973	(+/- 38)	(k=2)
	1824,2	1824,2	1998,1	1874,5	1892,9	1819,6	2192,7	2245,3	1897,4	2043,9	1961,3	(+/- 98,9)	(k=2)
	24,67	24,67	23,34	26,34	23,67	30,67	28,00	24,34	23,34	23,67	25,27	(+/- 1,55)	(k=2)
10.011	7,197	6,986	7,411	6,800	7,099	6,999	7,852	7,906	6,923	6,926	0918	(+/- 34)	(k=2)
	2671,1	2469,6	2462,8	2477,5	2602,4	2446,7	2435,3	2522,3	2304,8	2380,4	2477,3	(+/- 79,3)	(k=2)
	23,34	22,00	23,33	22,30	21,33	21,67	22,67	21,33	21,67	22,67	22,22	(+/- 0,58)	(k=2)
10.014	8,372	8,535	8,360	8,350	8,310	8,694	8,290	8,996	8,216	8,369	1076	(+/- 23)	(k=2)
	1973,0	2039,3	2462,8	2213,3	1973,0	2204,1	2183,5	2201,8	2064,5	2282,0	2159,7	(+/- 103,1)	(k=2)
	21,67	21,67	23,33	20,67	20,67	21,33	22,00	21,00	21,33	22,00	21,57	(+/- 0,55)	(k=2)
10.017	8,050	8,202	8,337	7,577	6,698	7,752	8,885	8,603	8,157	8,542	1029	(+/- 52)	(k=2)
	1313,8	1199,3	1096,3	1197,1	1245,1	1384,7	1270,3	1197,1	1270,3	1384,7	1255,9	(+/- 57,4)	(k=2)
	28,00	26,00	25,34	26,34	25,67	27,67	24,34	26,67	27,34	27,34	26,47	(+/- 0,77)	(k=2)
10.018	7,856	7,422	6,820	7,229	7,847	7,682	7,910	7,600	7,840	8,029	0971	(+/- 32)	(k=2)
	2016,4	2387,2	1931,8	2565,8	2320,9	2314,0	2167,5	2121,7	1924,9	2124,0	2187,4	(+/- 133,6)	(k=2)
	23,33	23,67	23,67	25,33	24,67	24,00	23,67	23,33	22,33	24,33	23,83	(+/- 0,56)	(k=2)
	8,078	7,873	7,781	7,818	8,559	7,675	7,703	8,085	7,395	7,805	1003	(+/- 28)	(k=2)

Tableau 5 : Résultats du poinçonnement statique NF P84-507

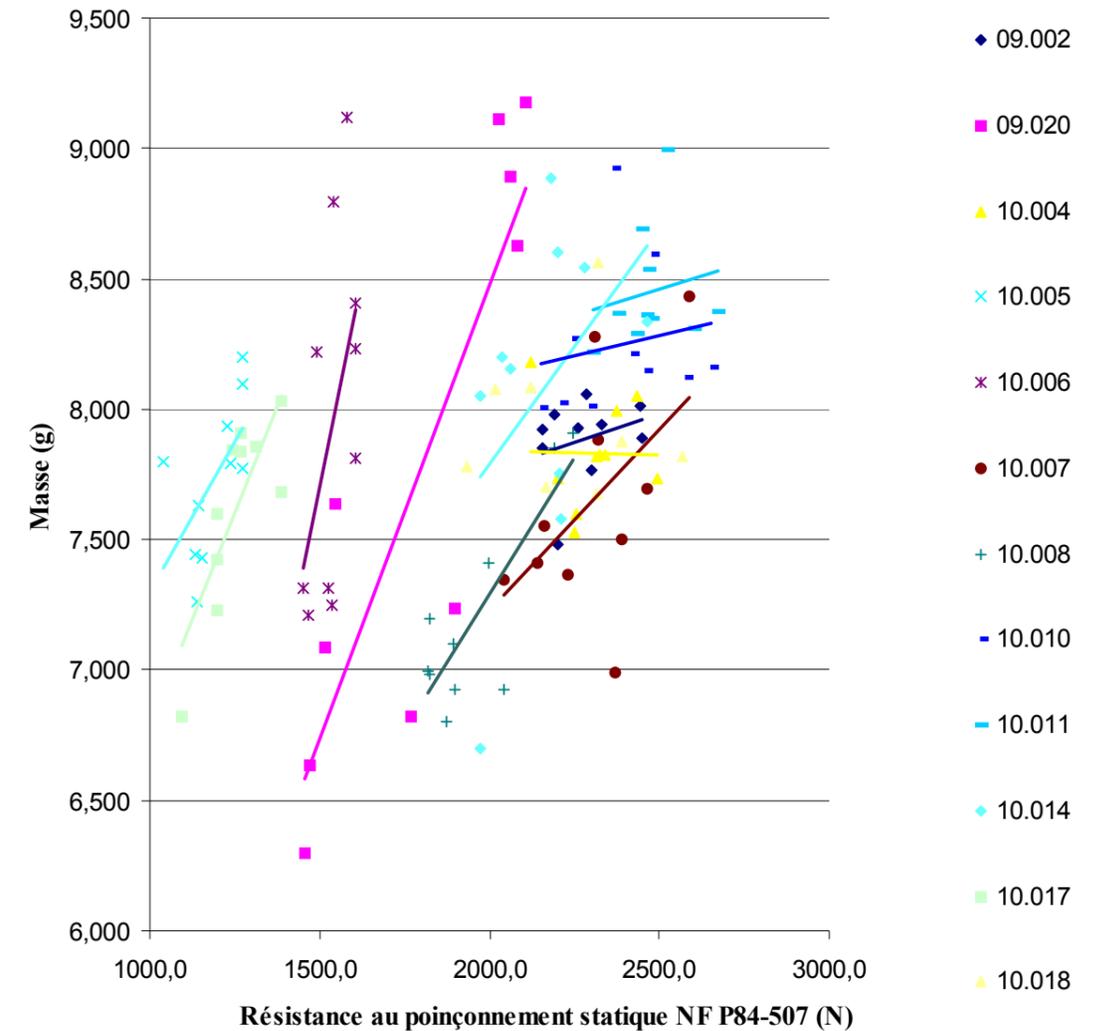


Figure 26 : Relation masse et résistance au poinçonnement statique NF P84-507

On peut également à partir de cet essai obtenir un module d'élasticité apparent (E_a) du géotextile. Pour cela, il suffit de le considérer comme pour la plupart des essais de poinçonnement statique sans support, à un essai de traction dont le principe est illustré figure 27.

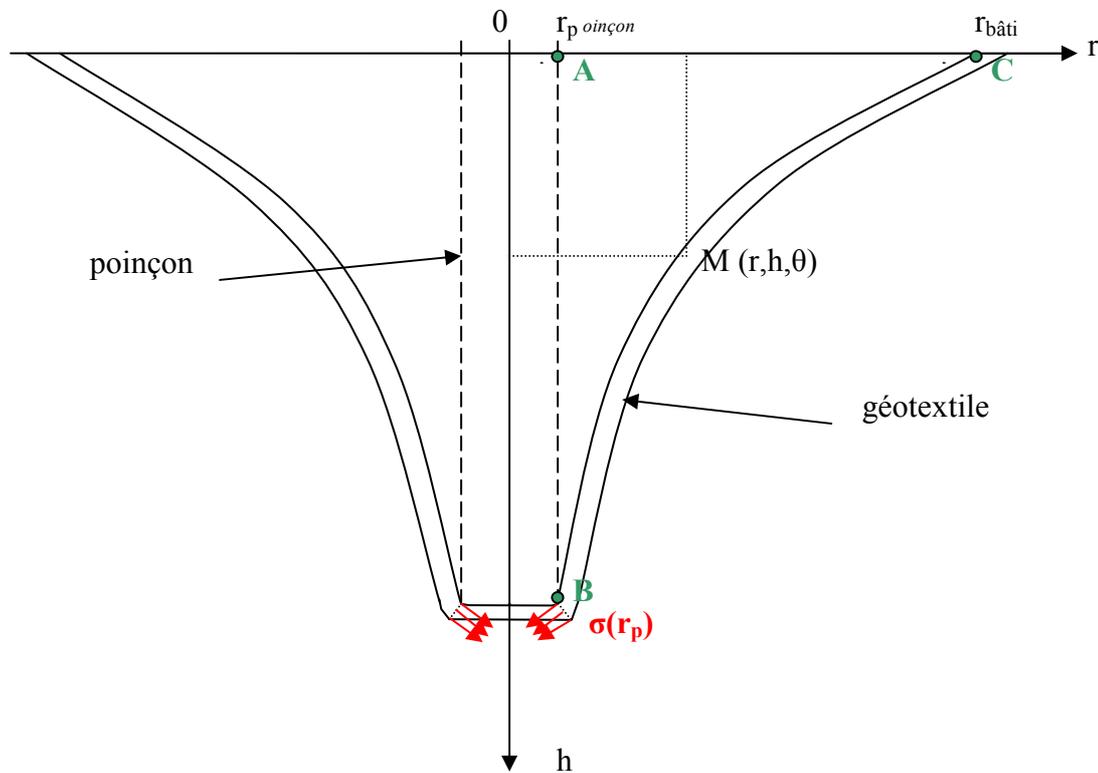


Figure 27 : Schématisation de la traction dans un géotextile lors de l'essai NF P84-507

On suppose alors ce matériau élastique isotrope et d'épaisseur constante puis on utilise la loi de Hooke :

$$\sigma(M) = E_a \cdot \varepsilon(M) \quad (2)$$

En se plaçant au point B on a,

$$\sigma(B) = \frac{F}{S(B)} = \frac{F}{2\pi \cdot r_{\text{poinçon}} \cdot e} \quad (3)$$

avec: e : épaisseur du géotextile

dt : intervalle de temps entre les mesures consécutives de forces et d'enfoncement du poinçon

F : la force exercée par le poinçon à l'instant $t+dt$

$r(M)$: la variation de la distance du point M au bord du poinçon entre l'instant t et $t+dt$

$\sigma(M)$: la contrainte au point M entre l'instant t et $t+dt$

$\varepsilon(M)$: la déformation au point M entre l'instant t et $t+dt$

$S(M)$: surface de géotextile mis en tension au point M considéré et vaut:

$$S(M) = 2\pi.r(M).e$$

et d'après la figure 28 on a,

$$\varepsilon(B) = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4)$$

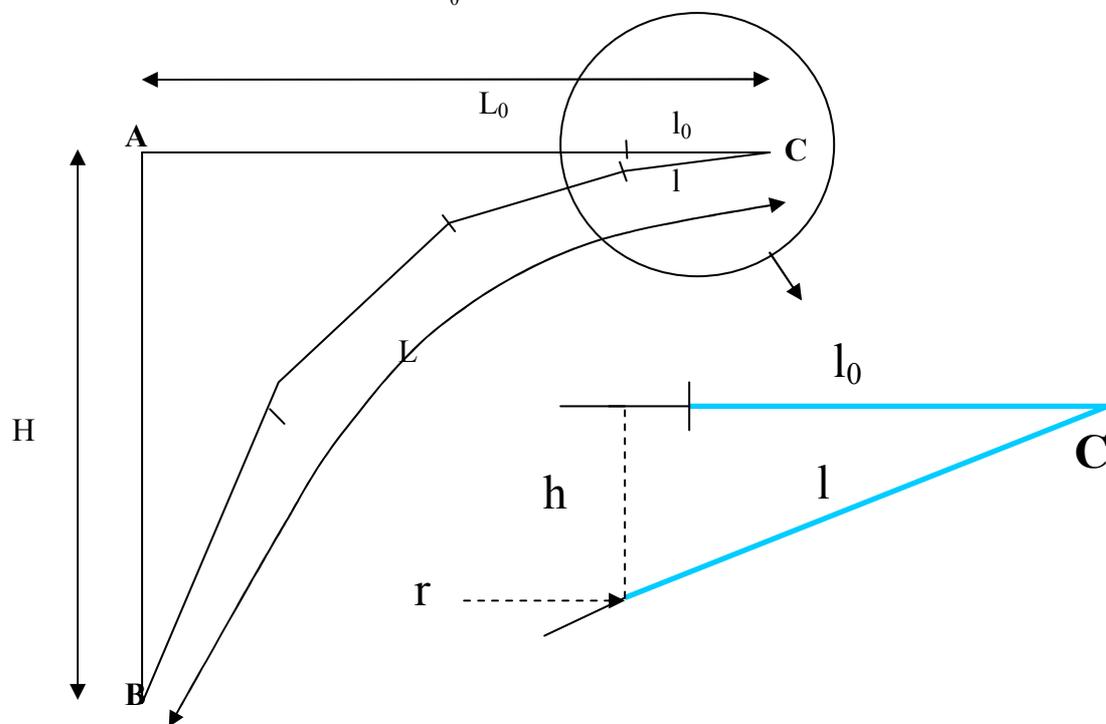


Figure 28 : Déformation d'un géotextile durant l'essai NF P84-507

avec l , la variation de chaque largeur unitaire l_0 entre t et $t+dt$.

Comme on peut le voir sur la figure 27, la distance r est variable et diminue lorsque l'on se rapproche du poinçon. Ceci implique donc d'après la formule (3) que la contrainte est d'autant plus forte que l'on s'en rapproche et explique alors la location de la rupture à cet endroit.

L'allongement de chaque segment unitaire n'est donc pas constant, et se trouve donc plus important dans les zones où la contrainte est plus forte.

Bien que la valeur de L ne corresponde alors pas à la distance BC , nous accepterons cette égalité pour nos calculs car nous ne possédons pas le matériel permettant la mesure de L .

Les valeurs du module d'élasticité apparent ainsi obtenues figurent dans le tableau 6.

Référence GTX	Module d'élasticité apparent en MPa
09.002	26,1
09.020	21,0
10.004	23,1
10.005	10,0
10.006	14,9
10.007	28,3
10.008	15,3
10.011	27,9
10.014	24,2
10.017	9,6
10.018	19,4

Tableau 6 : Modules d'élasticité apparents

A la suite de plusieurs essais, j'ai remarqué que contrairement à ceux que l'on peut trouver dans la littérature, il n'y a pas superposition des résistances pour le complexe géomembrane PEHD et géotextile de masse au moins égale à 1000 g/m^2 .

En effet comme on peut le voir sur la figure 29, les modes de ruptures sont différents. Pour un matériau seul (figure 29a), la rupture à lieu après plastification et/ou écrouissage (pour les géotextiles il y a seulement un écrouissage) de la zone périphérique du poinçon, là où la surface en traction est la plus petite et donc la contrainte est la plus forte. Pour un complexe géomembrane-géotextile, la géomembrane moins résistante se plastifie la première. Le géotextile de forte mase surfacique et donc épais vient ensuite gonfler la géomembrane. Moins ductile, il rompt en général le premier avant de venir éclater cette dernière au centre du piston et non sur son contour (figure 29b).

De la figure 29c on peut dire qu'il y a seulement additivité des résistances à la rupture. En effet, pour un effort courant de 1000 N , effort exercé par un granulat dans une ISD avec 30 m de déchets (Guéret, 2009), l'enfoncement correspondant est différent. Ce dernier, synonyme de l'endommagement subit par la GMB, prouve que la superposition des déformations n'est pas vérifiée.

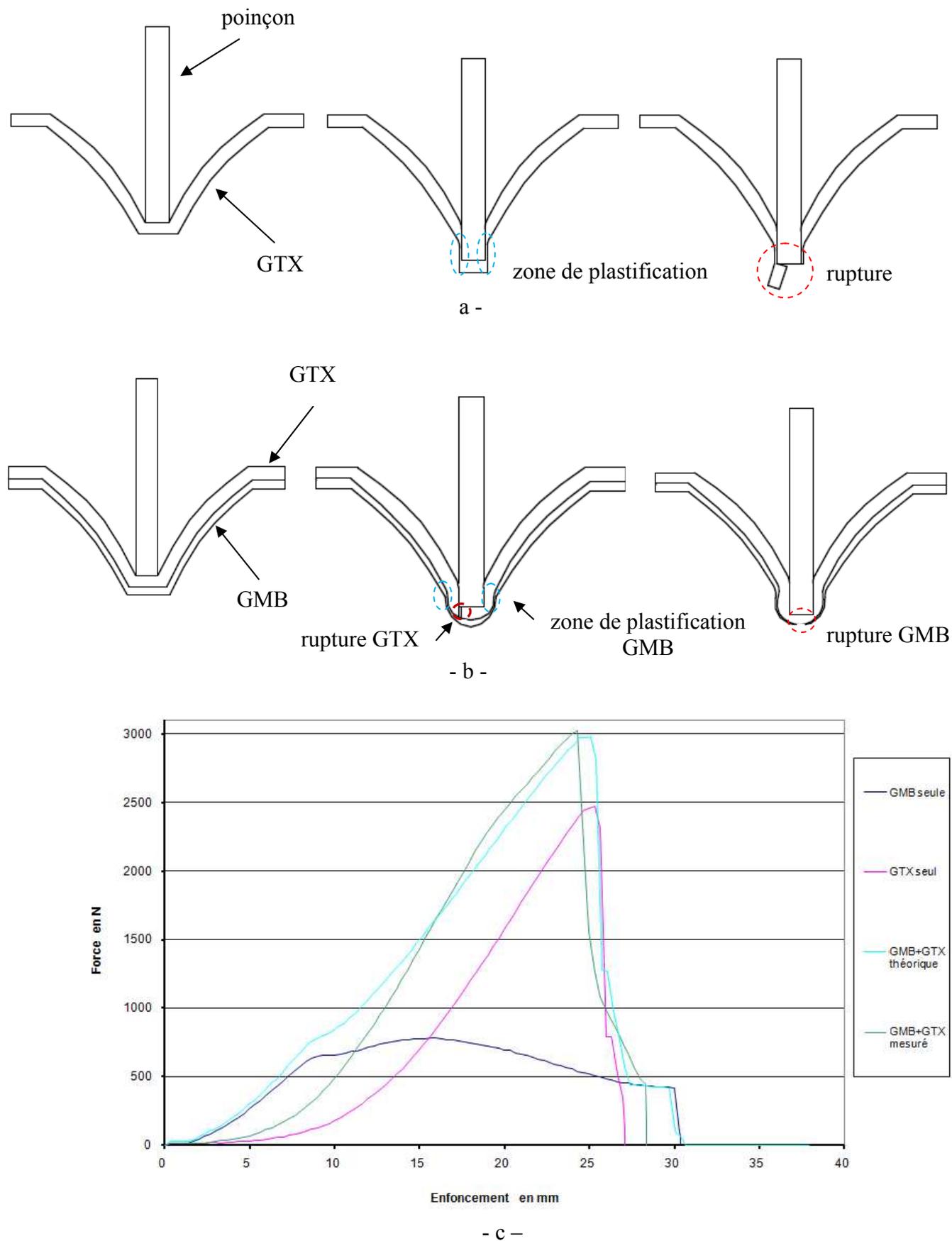


Figure 29 : Mode de rupture de l'essai NF P84-507

2.2.3 Mode de fabrication

Comme il est dit précédemment, la résistance d'un géotextile dépend de son mode de fabrication. Malheureusement, celui-ci est tenu secret par leur producteur.

J'ai tout de même réussi à recueillir des informations importantes ne figurant souvent pas dans les fiches techniques sur la nature du polymère de base et son origine (recyclé ou naturel) ainsi que sur la longueur des fibres.

Celles-ci figurent dans le tableau 7.

Référence GTX	Polymères principaux	Longueurs des fibres
09.002	Polypropylène vierge	Courtes
09.020	Polypropylène vierge	Longues
10.004	Polypropylène vierge	Courtes
10.005	Polypropylène et polyester recyclé	Courtes
10.006	Polypropylène vierge	Longues
10.007	Polypropylène vierge	Courtes
10.008	Polypropylène vierge	Courtes
10.011	Polypropylène vierge	Courtes
10.014	Polypropylène vierge	Courtes
10.017	Polypropylène multicolore	Courtes
10.018	Polypropylène vierge	Longues

Tableau 7 : Mode de fabrication des géotextiles utilisés

3 Réalisation des essais de performances

D'après le tableau de synthèse 2 en partie I.2.3 l'essai DC et l'essai d'endommagement statique semblent être ceux qui simulent le mieux le poinçonnement en ISD.

J'ai donc choisi de les réaliser pour ensuite essayer de lier leurs résultats avec les caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles.

3.1 Essai d'endommagement statique

L'appareillage utilisé est celui décrit en partie I.2.2 et illustré en figure 18.

Pour représenter au mieux les ISD nous avons choisi d'utiliser les 2 types de granulats rencontrés en couche drainante, c'est-à-dire roulés et concassés. On trouve leur courbe granulométrique en annexe 5.

La réalisation d'un essai est longue et comprend différentes actions détaillées comme suit:

- tamiser en premier lieu les 150 kg de granulats, afin de s'assurer de la bonne fraction granulométrique du matériau, à cause des éclatements qui peuvent survenir pendant les essais et créer des éléments plus petits ;
- découper et mettre en place la géomembrane et le géotextile de protection ;
- mettre en place les granulats ;
- appliquer le chargement de 300 kPa pendant une durée de 100 heures ;
- démonter l'essai afin de récupérer les éprouvettes de géosynthétiques ;
- procéder à la caractérisation de l'endommagement de la géomembrane, visuellement et à l'aide de l'essai de traction biaxiale.

Comme nous avons beaucoup d'essais à réaliser, nous avons utilisé 2 presses pour mener en simultané un essai avec granulats roulés et un essai avec granulats concassés.

Nous avons même pu revenir sur certains essais dont le test d'éclatométrie n'a pas abouti à cause d'un dysfonctionnement de l'appareillage.

Le planning des essais est illustré sur la figure 30. Au total 14 essais ont été réalisés. Pour chacun, 4 heures de préparation ont été nécessaires uniquement pour démonter l'essai précédant et tamiser puis recharger les granulats. A cela se rajoute 1 heure pour découper les éprouvettes sans compter les nombreuses heures d'interprétation de chaque essai.

Février			Mars			Avril			Mai		
Lun	1		Lun	1		Jeu	1		Sam	1	GMB avec GTX 10.017
Mar	2		Mar	2		Ven	2		Dim	2	
Mer	3		Mer	3	GMB avec GTX 10.005	Sam	3		Lun	3	
Jeu	4		Jeu	4		Dim	4		Mar	4	
Ven	5		Ven	5		Lun	5		Mer	5	
Sam	6		Sam	6		Mar	6		Jeu	6	
Dim	7		Dim	7	GMB avec GTX 10.006	Mer	7		Ven	7	
Lun	8		Lun	8		Jeu	8		Sam	8	
Mar	9		Mar	9		Ven	9		Dim	9	
Mer	10		Mer	10		Sam	10		Lun	10	
Jeu	11		Jeu	11		Dim	11	GMB avec GTX 10.014	Mar	11	
Ven	12	GMB sans GTX	Ven	12	GMB avec GTX 10.007	Lun	12		Mer	12	
Sam	13		Sam	13		Mar	13		Jeu	13	
Dim	14		Dim	14		Mer	14		Ven	14	
Lun	15		Lun	15		Jeu	15		Sam	15	
Mar	16		Mar	16		Ven	16		Dim	16	
Mer	17	GMB avec GTX 09.002	Mer	17	GMB avec GTX 10.008	Sam	17	GMB avec GTX 10.017	Lun	17	
Jeu	18		Jeu	18		Dim	18		Mar	18	
Ven	19		Ven	19		Lun	19		Jeu	19	
Sam	20		Sam	20		Mar	20		Mer	20	
Dim	21	GMB avec GTX 09.020	Dim	21	GMB avec GTX 10.010	Mer	21	GMB avec GTX 10.018	Ven	21	
Lun	22		Lun	22		Jeu	22		Sam	22	
Mar	23		Mar	23		Ven	23		Dim	23	
Mer	24		Mer	24		Sam	24		Lun	24	
Jeu	25		Jeu	25		Dim	25	GMB avec GTX 10.017	Mar	25	
Ven	26	GMB avec GTX 10.004	Ven	26		Lun	26		Mer	26	
Sam	27		Sam	27		Mar	27		Jeu	27	
Dim	28		Dim	28	GMB avec GTX 10.011	Mer	28	GMB avec GTX 10.014	Ven	28	
			Lun	29		Jeu	29	GMB avec GTX 10.017	Sam	29	
			Mar	30		Ven	30		Dim	30	
			Mer	31					Lun	31	

	Granulats roulés
	Granulats concassés
	Mise en place et préparation des essais

Figure 30 : Planning des essais d'endommagement statique

3.1.1 Observation visuelle

Elle s'est déroulée comme suit :

- examen visuel approfondi de l'ensemble de la surface de la géomembrane pour chaque éprouvette soumise à un essai ;
- classification des dommages suivant la nomenclature adoptée et dénombrement des dommages de chaque type pour chaque éprouvette ;
- classement des observations visuelles, faites par deux opérateurs (D. Croissant et moi-même), en répartissant, pour chacun des types, les dommages en trois catégories selon leur importance (A = dommage mineur, B et C = dommage non acceptables).

Pour éviter une surestimation des résultats, on évite de réaliser les observations visuelles à de multiples reprises, pour que les opérateurs étalonnent de manière identique leurs observations.

En effet lors des travaux d'Aufrère (2008) et Guéret (2009), on a remarqué une surestimation ou sous-estimation des défauts lorsque les observations avaient lieu respectivement sur une série d'échantillons faiblement ou fortement endommagés.

De plus, il faut faire très attention car sur notre support souple, la géomembrane subit des déformations importantes. Or l'endommagement créé par une déformation se révèle par la

suite lors de l'essai d'éclatométrie moins important que celui créé par une indentation (voir figure 31) avec laquelle on aurait tendance à la confondre. Les contraintes subies par la géomembrane ne sont plus uniquement de la compression et les défauts sont plus étendus en surface, mais avec une faible réduction de l'épaisseur.

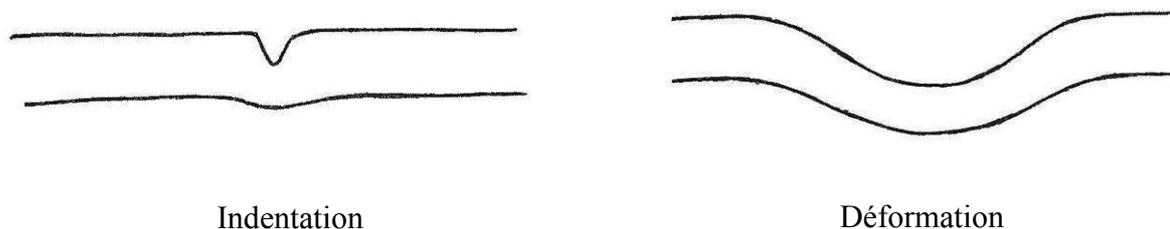


Figure 31 : Exemple de type de défauts (Aufrère, 2008)

Comme il est déjà énoncé précédemment lors de la présentation de cet essai au paragraphe I.2.2, il y a une accumulation des contraintes vers le centre de l'éprouvette. On peut donc suivre la répartition des dommages (cercles en jaune sur la figure 32) vérifier la protection apportée par le géotextile pour des contraintes plus faibles, c'est-à-dire vers les bords. Si une éprouvette présente un unique défaut non acceptable en son centre, on peut tout de même considérer que son géotextile de protection a été plus efficace que celui d'une éprouvette présentant une multitude de défauts du même type moins importants mais sur toute sa surface. En effet, cet essai est peu reproductible et donc les granulats en contact avec la GMB peuvent être plus ou moins pénalisants. Le cercle en bleu correspond au défaut majeur.



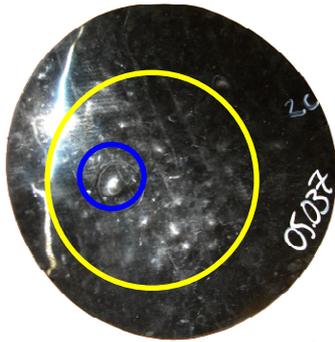
GMB 05.037 **sans GTX**
 Granulats concassés
 Défaut majeur: **limite percement**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection insuffisante



GMB 05.037 **sans GTX**
 Granulats roulés
 Défaut majeur: **indentation de catégorie C**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection insuffisante



GMB 05.037 avec GTX 09.002
 Granulats concassés
 Défaut majeur: **indentation de catégorie A⁺**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



GMB 05.037 avec GTX 09.002
 Granulats roulés
 Défaut majeur: **déformation de catégorie A⁺**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



GMB 05.037 avec GTX 09.020
 Granulats concassés
 Défaut majeur: **indentation de catégorie B⁻**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection insuffisante



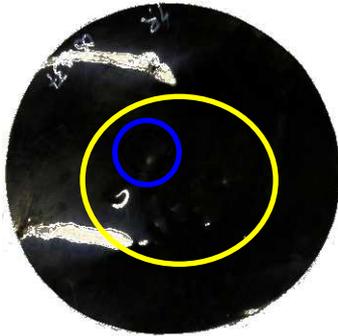
GMB 05.037 avec GTX 09.020
 Granulats roulés
 Défaut majeur: **déformation de catégorie A**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



GMB 05.037 avec GTX 10.004
 Granulats concassés
 Défaut majeur: **indentation de catégorie B**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **MAUVAISE**

Protection insuffisante réévaluée suffisante



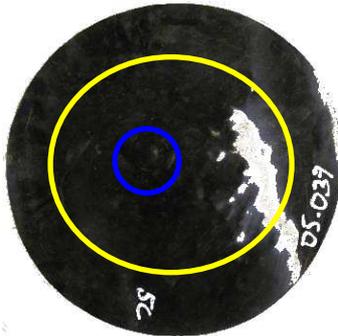
GMB 05.037 avec GTX 10.004

Granulats roulés

Défaut majeur: **déformation de catégorie A⁺**

Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



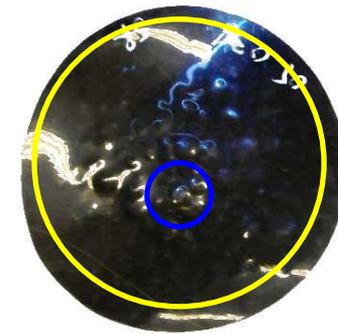
GMB 05.037 avec GTX 10.005

Granulats concassés

Défaut majeur: **indentation de catégorie A⁺**

Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



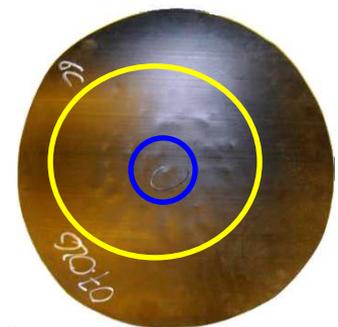
GMB 05.037 avec GTX 10.005

Granulats roulés

Défaut majeur: **déformation de catégorie B**

Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection insuffisante



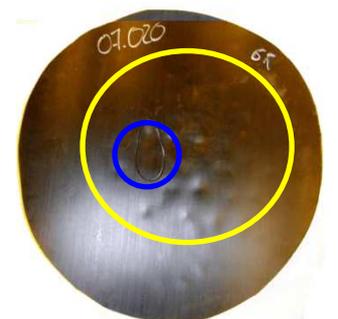
GMB 07.020 avec GTX 10.006

Granulats concassés

Défaut majeur: **indentation de catégorie A**

Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



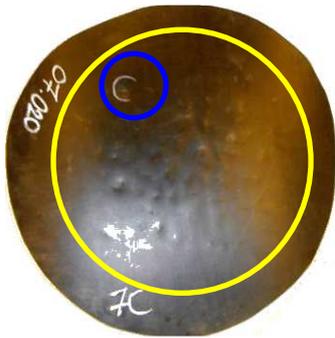
GMB 07.020 avec GTX 10.006

Granulats roulés

Défaut majeur: **déformation de catégorie A**

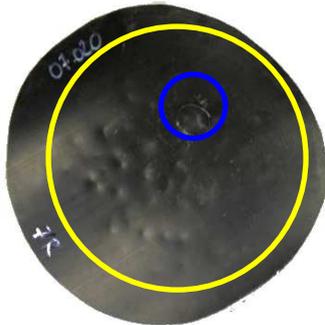
Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



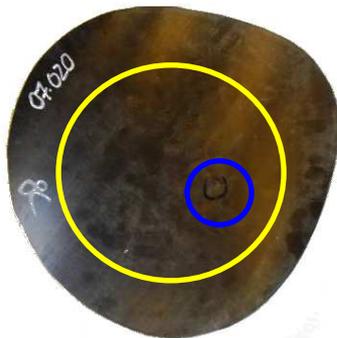
GMB 07.020 avec GTX 10.007
Granulats concassés
Défaut majeur: **indentation de catégorie B**
Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection insuffisante



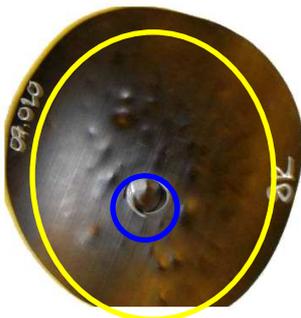
GMB 07.020 avec GTX 10.007
Granulats roulés
Défaut majeur: **déformation de catégorie A⁺**
Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **MAUVAISE**

Protection suffisante réévaluée en insuffisante



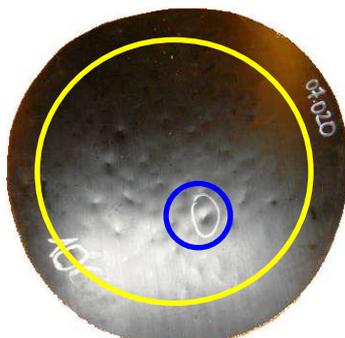
GMB 07.020 avec GTX 10.008
Granulats concassés
Défaut majeur: **indentation de catégorie A**
Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



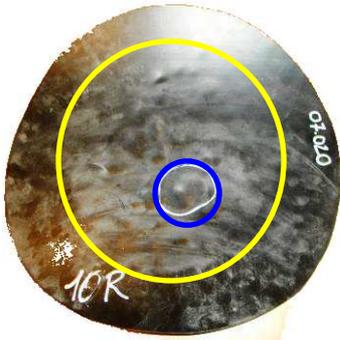
GMB 07.020 avec GTX 10.008
Granulats roulés
Défaut majeur: **déformation de catégorie B**
Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection insuffisante



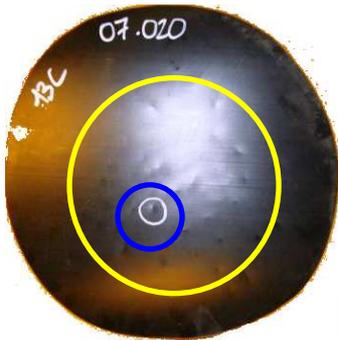
GMB 07.020 avec GTX 10.011
Granulats concassés
Défaut majeur: **indentation de catégorie A⁻**
Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **MAUVAISE**

Protection suffisante réévaluée en insuffisante



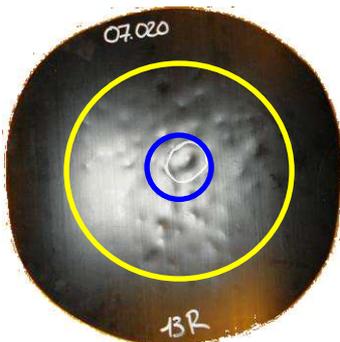
GMB 07.020 avec GTX 10.011
 Granulats roulés
 Défaut majeur: **déformation de catégorie A**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



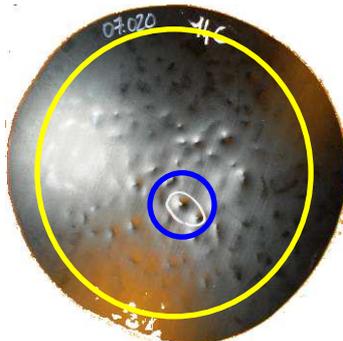
GMB 07.020 avec GTX 10.014
 Granulats concassés
 Défaut majeur: **indentation de catégorie A**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



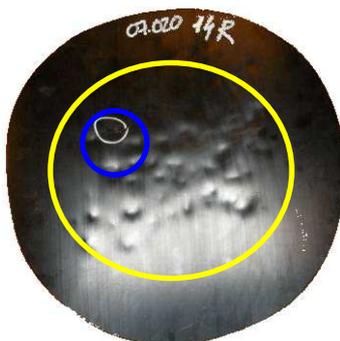
GMB 07.020 avec GTX 10.014
 Granulats roulés
 Défaut majeur: **déformation de catégorie A⁺**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante



GMB 07.020 avec GTX 10.017
 Granulats concassés
 Défaut majeur: **indentation de catégorie B⁻**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection insuffisante



GMB 07.020 avec GTX 10.017
 Granulats roulés
 Défaut majeur: **déformation de catégorie A⁺**
 Corrélation entre la répartition des dommages et l'évaluation du défaut majeur: **BONNE**

Protection suffisante

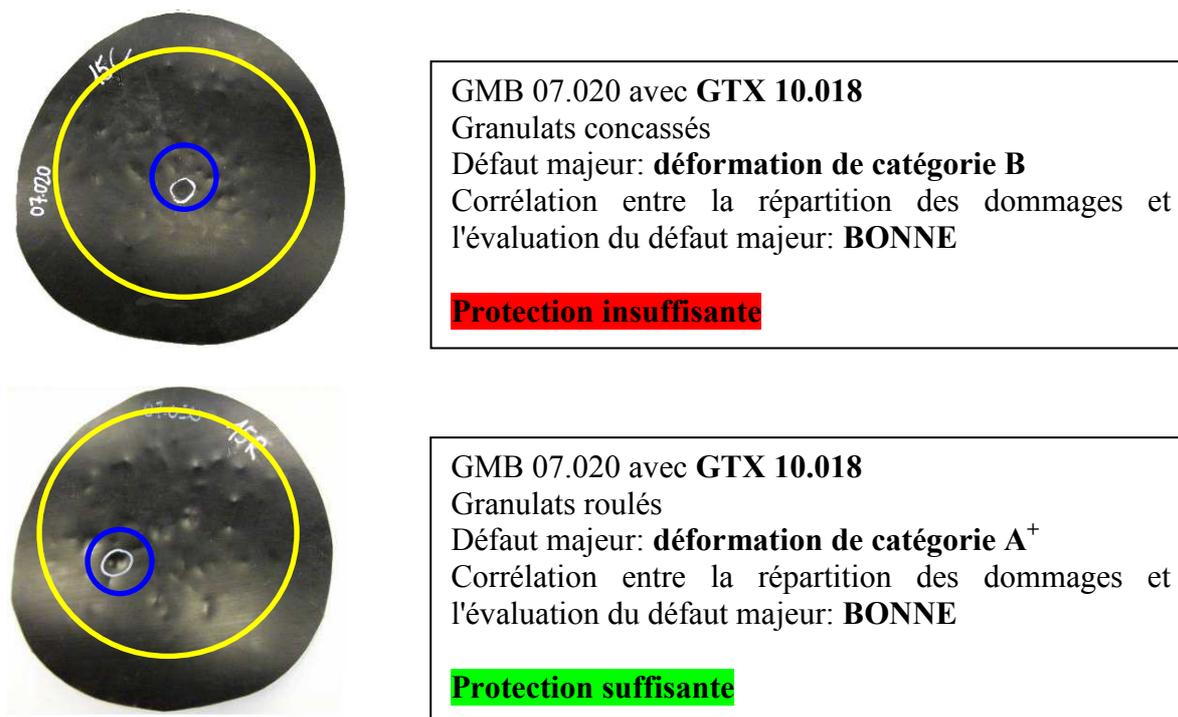


Figure 32 : Observations visuelles détaillées sur l'essai d'endommagement statique

Les résultats finaux des observations visuelles après réévaluation suivant la répartition des défauts figurent dans le tableau 8.

Référence GTX	Evaluation visuelle de la protection avec des granulats roulés	Evaluation visuelle de la protection avec des granulats concassés
09.002	Suffisante	Suffisante
09.020	Suffisante	Insuffisante
10.004	Suffisante	Suffisante
10.005	Insuffisante	Suffisante
10.006	Suffisante	Suffisante
10.007	Insuffisante	Insuffisante
10.008	Insuffisante	Suffisante
10.011	Suffisante	Insuffisante
10.014	Suffisante	Suffisante
10.017	Suffisante	Insuffisante
10.018	Suffisante	Insuffisante

Tableau 8 : Synthèse sur les observations visuelles

Un tableau de synthèse des observations visuelles figure en annexe 6.

3.1.2 Essais de traction bi-axiale

Sur chaque éprouvette soumise à l'essai d'endommagement statique ($\varnothing = 0,5$ m), on a prélevé une éprouvette pour l'essai de traction bi-axiale ($\varnothing = 0,3$ m, $\varnothing_{\text{utile}} = 0,2$ m) dans les 24 heures suivant l'essai. Dans la mesure du possible, le dommage jugé le plus important a été placé au centre de l'éprouvette.

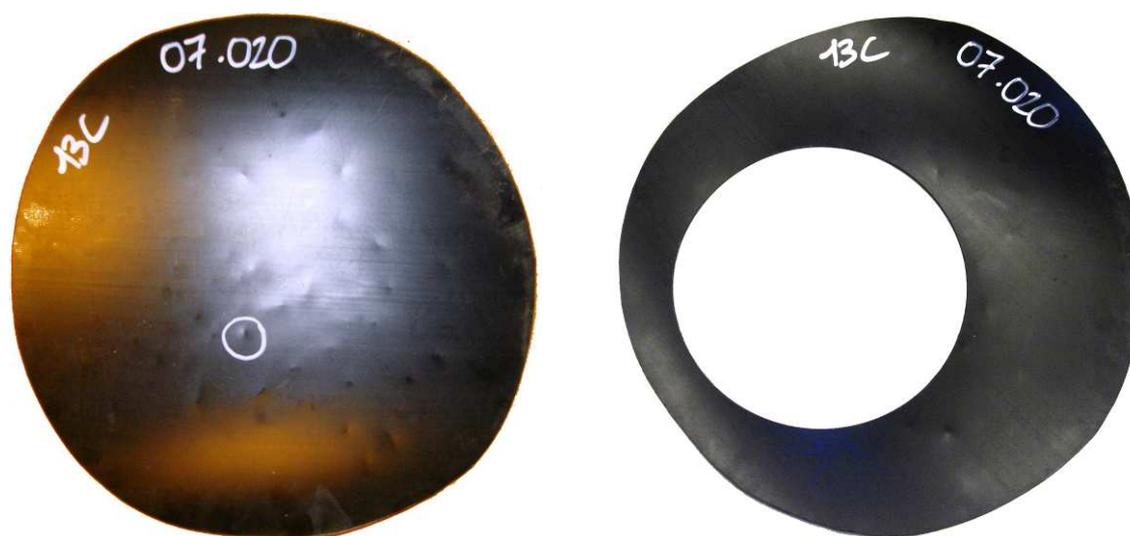


Figure 33 : Prélèvement d'une éprouvette pour l'essai de traction bi-axiale

Les résultats d'évaluation du défaut majeur de chaque échantillon figurent dans le tableau 9.

Référence GTX	Importance du défaut principal Granulats roulés	Importance du défaut principal Granulats concassés
09.002	Acceptable	Acceptable
09.020	Acceptable	Inacceptable
10.004	Acceptable	Acceptable
10.005	Inacceptable	Acceptable
10.006	Acceptable	Inacceptable
10.007	Acceptable	Acceptable
10.008	Inacceptable	Acceptable
10.011	Acceptable	Acceptable
10.014	Acceptable	Acceptable
10.017	Inacceptable	Acceptable
10.018	Acceptable	Inacceptable

Tableau 9 : Résultats des essais de traction bi-axiale

Les valeurs et courbes de chaque essai figurent en annexe 7.

Ces résultats ne confirment pas de manière satisfaisante le classement établi lors de l'observation visuelle dans la mesure où, pour 6 essais sur 22 réalisés, elle ne correspond pas à la valeur de la déformation à rupture du défaut majeur de l'échantillon de géomembrane (essais en caractères jaunes).

Le critère de satisfaction visuel pour les configurations d'essais avec granulats roulés et concassés est réévalué à partir de l'étalonnage effectué à l'aide des essais de traction bi-axiale (tableau 10). Comme ces observations visuelles ne se limitent pas au seul classement du défaut majeur, elles ne sont donc pas corrigées par l'essai d'éclatométrie mais seulement complétées lorsqu'un défaut se révèle inacceptable.

Référence GTX	Protection avec granulats roulés	Protection avec granulats concassés
09.002	Suffisante	Suffisante
09.020	Suffisante	Insuffisante
10.004	Suffisante	Suffisante
10.005	Insuffisante	Suffisante
10.006	Suffisante	Insuffisante
10.007	Insuffisante	Insuffisante
10.008	Insuffisante	Suffisante
10.011	Suffisante	Insuffisante
10.014	Suffisante	Suffisante
10.017	Insuffisante	Insuffisante
10.018	Suffisante	Insuffisante

Tableau 10 : Résultats sur la protection des GTX pour l'essai d'endommagement statique

3.2 Essai DC

Cet essai décrit dans la partie I, est très reproductible et nous permet d'attribuer un niveau de protection à un géotextile pour ensuite être confirmé par l'essai d'endommagement statique. Nous avons donc utilisé le même support en polychloroprène lors de ces deux essais.

Après plusieurs tests, nous avons remarqué que l'enfoncement du piston paraît ne presque plus évoluer au-delà de 24 h.

Une charge d'1 kN a alors été appliquée pendant cette durée.

Les valeurs sur l'enfoncement final du piston figurant dans le tableau 11 ne permet pas d'attribuer un critère d'acceptabilité mais seulement de nous munir d'une nouvelle caractéristique mécanique.

Le capteur de force du poinçon n'est pas assez sensible pour mesurer l'enfoncement dès le contact avec le géotextile.

On a donc choisi comme point de départ, l'enfoncement correspondant à une force de 100 N, soit 10 % de la force maximale exercée.

Les résultats figurent dans le tableau 11.

Référence GTX	Enfoncement (mm)
09.002	10,63
09.020	11,34
10.004	10,49
10.005	11,41
10.006	9,96
10.007	9,76
10.008	10,58
10.011	10,50
10.014	10,64
10.017	11,36
10.018	10,66

Tableau 11 : Enfoncement final du piston lors de l'essai DC

4 Synthèse et commentaires sur les résultats

Le tableau 12 récapitule les résultats des caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles ainsi que leur niveau de satisfaction vis-à-l'essai DC et d'endommagement statique; essais les plus fidèles aux sollicitations de poinçonnements rencontrées en ISD.

Référence interne	Épaisseur (mm) NF EN ISO 9863-1	Perforation dynamique (mm) NF EN ISO 13433	Poinçonnement statique (kN) NF G38-019	Poinçonnement CBR (kN) NF EN ISO 12236	Résistance à la traction SP-ST (kN/m) NF EN ISO 10319		Déformation à l'effort de traction max. SP-ST (%) NF EN ISO 10319		Masse surfacique mesurée (g)	Poinçonnement statique -poinçon 8mm- NF P84-507				Module d'élasticité apparent en Mpa	Polymères principaux	Longueurs des fibres	Essai DC		Protection à l'essai d'endommagement statique	
					SP	ST	SP	ST		Force (N)	Enfoncement (mm)		Enfoncement (mm)				Protection	Granulats roulés	Granulats concassés	
09.002	7,5	0	6	11	65	65	90	90	1004 (+/- 18)	2277,2 (+/- 76,4)	24,67 (+/- 1,10)	26,1	Polypropylène vierge	Courtes	10,63	Insuffisante	Suffisante	Suffisante		
09.020	6,5	2,5	6	10	65	65	50	55	987 (+/- 89)	1793,9 (+/- 173,9)	20,07 (+/- 0,61)	21	Polypropylène vierge	Longues	11,34	Insuffisante	Suffisante	Insuffisante		
10.004	7	2	3,6	10	34	75	90	60	997 (+/- 21)	2310,9 (+/- 73,8)	22,77 (+/- 1,79)	23,1	Polypropylène vierge	Courtes	10,49	Suffisante	Suffisante	Suffisante		
10.005	7	-	-	5,2	21	40	80	50	985 (+/- 27)	1189,9 (+/- 50)	24,9 (+/- 0,75)	10	Polypropylène et polyester recyclé	Courtes	11,41	Insuffisante	Insuffisante	Suffisante		
10.006	7,2	6	5,6	9,6	55	55	105	100	1014 (+/- 57)	1541,3 (+/- 37,8)	22,67 (+/- 1,33)	14,9	Polypropylène vierge	Longues	9,96	Suffisante	Suffisante	Insuffisante		
10.007	6,1	1	-	11	55	100	75	75	973 (+/- 38)	2301,6 (+/- 105,8)	19,83 (+/- 1,03)	28,3	Polypropylène vierge	Courtes	9,76	Insuffisante	Insuffisante	Insuffisante		
10.008	7,5	0	6,5	12	65	80	85	85	918 (+/- 34)	1961,3 (+/- 98,9)	25,27 (+/- 1,55)	15,3	Polypropylène vierge	Courtes	10,58	Insuffisante	Insuffisante	Suffisante		
10.011	6,3	0	4,8	10	45	66	85	70	1076 (+/- 23)	2477,3 (+/- 79,3)	22,22 (+/- 0,58)	27,9	Polypropylène vierge	Courtes	10,5	Insuffisante	Suffisante	Insuffisante		
10.014	6,55	0	3,8	11,4	69	73	70	67	1029 (+/- 52)	2159,7 (+/- 103,1)	21,57 (+/- 0,55)	24,2	Polypropylène vierge	Courtes	10,64	Suffisante	Suffisante	Suffisante		
10.017	7	4	3,7	5,1	20	48	150	95	971 (+/- 32)	1255,9 (+/- 57,4)	26,47 (+/- 0,77)	9,6	Polypropylène multicolor	Courtes	11,36	Insuffisante	Insuffisante	Insuffisante		
10.018	7,1	0	5	12	65	65	85	105	1003 (+/- 28)	2187,4 (+/- 133,6)	23,83 (+/- 0,56)	19,4	Polypropylène vierge	Longues	10,66	Suffisante	Suffisante	Insuffisante		

Tableau 12 : Tableau général des caractéristiques physiques et mécaniques des géotextiles ainsi que leur niveau de satisfaction vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement

Les entêtes de colonnes grises sont les données issues des fiches techniques ou fournis par les producteurs alors que les entêtes de colonnes bleues sont les résultats des essais que j'ai réalisés.

Nous disposons désormais d'un grand nombre de caractéristiques plus ou moins pertinentes.

Afin de ne pas s'encombrer d'un grand nombre de résultat il peut être judicieux de sélectionner ceux qui peuvent nous aider au dimensionnement.

Commençons d'abord par les essais de poinçonnements sans support NF P84-507 et NF EN ISO 12236 avec poinçon cylindre, qui, comme l'essai NF EN ISO 10319, nous donnent des propriétés de résistance à la traction du matériau. L'essai CBR (NF EN ISO 12236) met en œuvre un poinçon de gros diamètre 50mm, et représente donc mal, tout comme l'essai NF ISO 10319 qui met lui en œuvre des bandes de grande largeur, les contraintes réelles de traction lors du poinçonnement sur chantier lié à la présence d'aspérités, généralement de petit diamètre. Ils ont donc moins d'intérêt pour l'aide au dimensionnement des protections que l'essai NF P84-507.

On n'utilisera également pas la valeur de l'enfoncement du poinçon lors de l'essai DC. Les différences séparant les valeurs de chaque échantillon sont de l'ordre de grandeur de l'erreur commise pour le point de départ. Cette erreur correspond à la distance séparant la face supérieure du géotextile et le sommet du poinçon au départ de l'essai. Soit quelques dixièmes de millimètres dans le sens positif (sens d'enfoncement du piston) ou négatif.

En s'intéressant maintenant à la fois aux résultats des essais DC et d'endommagement statique ainsi qu'aux caractéristiques physiques et mécaniques surlignées en jaune dans le tableau 12, on peut dégager quelques observations. Il est cependant nécessaire de rester prudent dans la mesure où les résultats présentés sont obtenus sur la base d'un seul essai. Pour pouvoir tirer des conclusions définitives, il sera nécessaire de reproduire cet essai plusieurs fois sur un même produit.

Tout d'abord, on remarque que les géotextiles qui se révèlent insuffisants pour des granulats concassés sont les géotextiles de faible épaisseur ainsi que les géotextiles à fibres continues.

Pour l'épaisseur, ceci s'explique par la capacité du matériau à épouser un objet saillant et pour les fibres continues par la capacité de cet objet à s'introduire entre les nappes de filaments.

Ensuite, pour les granulats roulés, on peut signaler que les géotextiles qui se révèlent insuffisants sont ceux qui présentent un module d'élasticité apparent et une masse surfacique faible.

Ceci s'explique par la capacité du géotextile à se déformer un minimum sous sollicitation de poinçonnement, et donc à imposer un minimum de déformation à la géomembrane.

Enfin, on s'aperçoit que certain géotextile n'apporte pas la même protection pour l'essai DC, pour l'essai d'endommagement avec des granulats roulés, ou avec des granulats concassés.

Je suppose que ceci est dû à la localisation du prélèvement de l'éprouvette, et donc à l'hétérogène des géotextiles (cf partie II.2.2.1). J'en déduis alors qu'une masse de 1000g/m² est la limite de satisfaction pour une bonne protection du géotextile contre les sollicitations de poinçonnement dû aux charges de service de 30 m de déchets.

CONCLUSION

La réalisation d'essai de performance pour des sollicitations de service est une démarche d'intérêt majeur pour évaluer la résistance au poinçonnement du dispositif d'étanchéité par géomembrane.

Cette étude a mis en relief la difficulté de définir ce qu'est un endommagement par poinçonnement et quels en sont les indicateurs ; pour ceux-ci, on a retenu l'examen visuel, et surtout l'évolution des caractéristiques en éclatométrie.

Les essais d'endommagement statique, les plus réalistes des sollicitations rencontrées in situ, ne peuvent être la solution permanente à l'aide au dimensionnement des DEG, parce qu'ils sont longs, pénibles de mise en œuvre, et même en multipliant leur nombre (22 dans cette étude), ils ne peuvent intégrer la diversité des cas possibles, liée à la nature des produits géosynthétiques (type et masse surfacique des géotextiles, épaisseur de la géomembrane, ...) et à la charges d'exploitation (hauteur de déchets). La nécessité de disposer de valeurs issus du marquage CE, de la certification ASQUAL ou d'essais simples de laboratoire pour recommander un géotextile de protection s'impose donc.

Pour les géotextiles testés en essais de performances, des valeurs issus des fiches techniques et d'essais simples dits « Index » que j'ai réalisé, ont servi pour la comparaison avec les essais de performances. Celle-ci est loin d'être parfaite, mais globalement il se dégage de grandes tendances, qui peuvent constituer le début d'une démarche de dimensionnement, permettant au moins de définir les "cas à exclure" ; ceci est à prendre avec beaucoup de précaution et reste à affiner avec des essais complémentaires car les résultats présentés sont obtenus sur la base d'un seul essai

A l'issu de cette étude je préconiserais donc comme géotextile pour la protection contre le poinçonnement d'une GMB en PEHD de 2 mm d'épaisseur soumise à une charges de 30 m de déchets,

- pour des granulats roulés :
 - une masse surfacique au moins égale (valeur minimum sur une largeur de production) à 1000 g/m² ;
 - un module d'élasticité apparent strictement supérieur à 10 MPa

- pour des granulats concassés :
 - une masse surfacique au moins égale (valeur minimum sur une largeur de production) à 1000 g/m² ;
 - une épaisseur supérieure à 6,5 mm ;
 - une composition en fibres courtes.

Dans cette démarche, l'utilisation de valeurs issues des fiches techniques du marquage CE ou de la certification ASQUAL n'est envisageable que dans la mesure où l'on considère la plage de variation de chaque valeur. En effet, la majorité des géotextiles sont très hétérogène dans leurs caractéristiques sur une largeur de production.

Dans les recommandations ci-dessus, il faudrait donc utiliser un géotextile de 1200 g/m² qui avec la plage de variation toléré de +/- 10% reste supérieur à 1000 g/m².

Je conseillerais également au marquage CE ou à la certification ASQUAL de modifier les essais de poinçonnement qu'ils recommandent dans la mesure où ils sont pour la plupart des essais de traction.

Cette étude est une approche qui, en aucun cas, ne peut être considérée comme finalisée. Il est donc prématuré et imprudent de se servir de ces données pour le dimensionnement d'un géotextile de protection.

En effet, de nombreux travaux restent à faire, s'adapter à la hauteur de déchets, utiliser un plus grand choix de géomembranes, et introduire de nouveaux essais index.

Par exemple, remplacer le poinçon de l'essai DC par une bille en acier de 20 mm de diamètre, pour simuler l'action d'un granulat roulé, ou bien par un poinçon pyramidal (ne pas utiliser le poinçon de l'essai NF G38-019 car il est trop saillant) pour simuler l'action d'un granulat concassé.

Bibliographie

- AFNOR (1988). NF G38-019, Textiles - Articles à usages industriels - Essais des géotextiles - Détermination de la résistance au poinçonnement, AFNOR.
- AFNOR (1992). NF P84-506, Géomembranes - Détermination de la résistance au poinçonnement dynamique, AFNOR.
- AFNOR (1996). NF P84-507, Essais des géomembranes - Détermination de la résistance au poinçonnement statique des géomembranes et des dispositifs d'étanchéité par géomembranes - Cas du poinçon cylindrique sans support, AFNOR.
- AFNOR (1998). NF P84-500, Géomembranes - Terminologie, AFNOR.
- AFNOR (2002). NF P84-510, Géomembranes - Détermination de la résistance au percement par granulats sur support rigide, AFNOR.
- AFNOR (2003). NF EN 13719, Géotextiles et produits apparentés - Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles en contact avec les barrières géosynthétiques, AFNOR.
- AFNOR (2005a). NF EN 13257, Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans les ouvrages d'enfouissement des déchets solides, AFNOR.
- AFNOR (2005b). NF EN 14574, Géosynthétiques - Détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal de géosynthétiques sur support, AFNOR.
- AFNOR (2006a). NF EN 14150, Géomembranes - Détermination de la perméabilité aux liquides, AFNOR.
- AFNOR (2006b). NF EN 13493, Géomembranes, géosynthétiques bentonitiques - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des ouvrages de stockage et d'enfouissement de déchets solides, AFNOR.
- AFNOR (2006c). NF EN ISO 12236, Géosynthétiques - Essai de poinçonnement statique (essai CBR), AFNOR.
- AFNOR (2007). NF EN ISO 13433, Géosynthétiques - Essai de perforation dynamique (essai par chute d'un cône), AFNOR.
- AFNOR (2008a). XP P84-700, Géosynthétiques bentonitiques - Généralités - Définitions, AFNOR.
- AFNOR (2008b). XP P84-523, Géomembranes, dispositif d'étanchéité par géomembranes – Détermination de la résistance au poinçonnement sous charge hydrostatique, AFNOR.
- AFNOR (2008c). XP P 84-503, Géomembranes, dispositif d'étanchéité par géomembranes – Détermination des caractéristiques en traction biaxiale, AFNOR.

- ASTM (2004). ASTM D6241, Standard Test Method for the Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50-mm Probe, ASTM.
- ASTM (2006a). ASTM D5494, Standard Test Method for the Determination of Pyramid Puncture Resistance of Unprotected and Protected Geomembranes, ASTM.
- ASTM (2006b). ASTM D5514, Standard Test Method for Large Scale Hydrostatic Puncture Testing of Geosynthetics, ASTM.
- ASTM (2007). ASTM D4833, Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes and Related Products, ASTM.
- Aufrère, A. (2008). Etude de la protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement – Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur, Polytech'Clermont-Ferrand, 102p.
- Benneton, J.-P et al. (2008) Géotechnique et risques naturels – Durabilité des géomembranes, vieillissement physico-chimique et endommagement mécanique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 251p.
- Bidim (1999). Aide au dimensionnement, Bidim Geosynthetics, CD-Rom.
- Budka, A. et al. (2006). Performances de différents géotextiles de protection de la géomembrane dans les installations de stockage de déchets, Rencontres géosynthétiques 2006, pp. 29-36.
- CFG (1998). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques - Fascicule n°12, Comité Français des Géosynthétiques, 58p.
- CFG (2001). Guide pour la réalisation et l'exploitation de planches d'essais sur DEG, Comité Français des Géosynthétiques, 24p.
- Code Permanent Environnement et Nuisances (1997). Arrêté du 9 septembre 1997. Décharges d'ordures ménagères – Décharges existantes et nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés. Bulletin 235 du 15 septembre 1997, pp. 6769-6779.
- Duquennoi, C. et Artières, O. (1997). Practical use of mechanical tests to design synthetic lining systems against localised damage, Proceedings Sardinia 97, 6th International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula Cagliari, ITA, 1997, pp. 177–187.
- Fayoux, D. et Pignon N. (1986). Comportement des géomembranes PVC au poinçonnement mécanique. 3rd International Conference on Geotextiles, Vienne, Autriche.
- Fayoux, D (1990). Durability of PVC géomembranes and resistance to mechanical puncturing, Geotextiles, Geomembranes and related products, Volume .2, pp. 561-565.
- Fibertex (sd). Guide de dimensionnement des géotextiles Fibertex, Beauchamp, Fibertex France SARL, 24p.

- Geofabrics (2007). Landfill basal liner protection model specification. Leeds, UK, Geofabrics Limited, 2p.
- Guéret, A. (2009). Etude de la protection des géomembranes contre les sollicitations de poinçonnement – Cas des sollicitations de service dans les installations de stockage de déchets. – Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur, Polytech'Clermont-Ferrand, 102p.
- Giroud, J.P. and Touze-Foltz, N. (2003). Geomembranes for landfills, Geosynthetics International, Volume. 10, n°. 4, pp. 124-133.
- Jones et al. (2000). Difficulties associated with the specification of protection geotextiles using only unit weight, Proceedings Eurogeo2, Bologna, Italy, pp. 551-555.
- Journal Officiel du Conseil de l'Union Européenne (1999). Directive 1999/31/CE du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets. JO n°182 du 16 juillet 1999, 1-19.
- Journal Officiel de la République Française (2002a). 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, 4028-4031.
- Journal Officiel de la République Française (2002b). 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, 6968.
- Journal Officiel de la République Française (2006). 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.
- Laine, D. et al. (1988). Loading Point Puncturability Analysis of Geosynthetic Liner Materials. Geosynthetics 89 Conference, San Diego, USA 1988.
- MEDD (2002). Guide de recommandations à l'usage des tiers-experts pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive de centres de stockage, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.
- MEEDDM (2009). Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets – Version 2, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- Narejo et al. (1996). Puncture protection of geomembranes Part I: Theory, Geosynthetics International, Volume 3, n°. 5, pp. 605-628.
- Pirron, T. (1998). Mise au point d'une méthode de dimensionnement des dispositifs d'étanchéité par géomembrane vis-à-vis du poinçonnement – Mémoire de fin d'études, Université Pierre et Marie Curie.
- Reddy, R. et Saichek, E. (1998). A rational design for the protection of landfill geomembrane liners, 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, pp. 289-294.

Touze-Foltz et al., (2006). Experimental Investigation of flow rates through composite liners at the metric scale. 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, pp. 305-308.

Touze-Foltz et al., (2008). Geoenvironmental applications of geosynthetics. Keynote lecture, Proceedings Eurogeo 4, Edinburgh, Scotland, 98p.

ANNEXES

Annexe 1 : Détail des calculs de l'essai d'éclatométrie

Annexe 2 : Synthèse d'Aufrère (2008) sur les principales méthodes de dimensionnement et recommandations existantes

Annexe 3 : Caractéristiques de la géomembrane portant la référence 05.031

Annexe 4 : Caractéristiques de la géomembrane portant la référence 07.020

Annexe 5 : Courbes granulométriques des granulats utilisés

Annexe 6 : Détail des observations visuelles

Annexe 7 : Tableau récapitulatif des résultats numériques des essais de traction bi-axiale effectués et graphiques contrainte-déformation correspondant

Annexe 1 : Détail des calculs de l'essai d'éclatométrie

La déformation est calculée suivant la relation ci-dessous donnée par Lambert et Duquennoi (Lambert et Duquennoi, 2001).

$$\varepsilon_t = \frac{R_t \cdot \alpha_t}{\frac{D}{2}} - 1$$

avec,

$$R_t = \frac{H_t^2 + \frac{D^2}{4}}{2H_t}$$

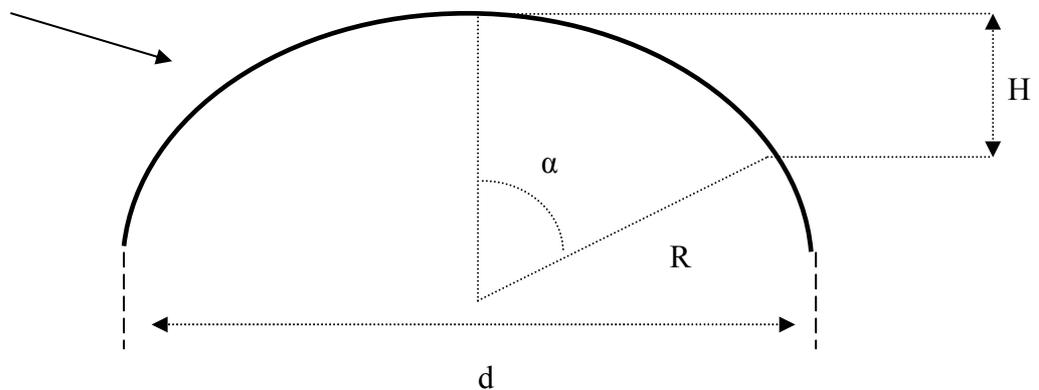
et,

$$\alpha_t = \text{Arctan} \left[\frac{D}{2(R_t - H_t)} \right] \quad \text{quand} \quad H_t \leq D/2$$

ou,

$$\alpha_t = \pi + \text{Arctan} \left[\frac{D}{2(R_t - H_t)} \right] \quad \text{quand} \quad H_t \geq D/2$$

déformée de la géomembrane



En supposant que la membrane ne travaille pas en flexion, la contrainte reste constante sur toute l'épaisseur et vaut :

$$\sigma_t = \frac{P_t \cdot R_t}{2e_t}$$

Notations utilisées :

H_t : déflexion de la géomembrane au centre en m à l'instant t

R_t : rayon de la déformée en m à l'instant t

α_t : angle correspondant en radians à l'instant t

e_t : épaisseur de la géomembrane en mm à l'instant t

D : diamètre intérieur de la cellule en m

P_t : pression de l'eau en kPa à l'instant t

ε_t : déformation à l'instant t

σ_t : pression subie par la géomembrane à l'instant t

Pour optimiser le calcul de la contrainte, l'épaisseur sera considérée variable au cours de l'essai. Elle est déterminée par la formule suivante en supposant que l'épaisseur de la géomembrane reste constante le long de la déformée, que le produit est incompressible et que son volume demeure inchangé lors de sa déformation:

$$e_t = e_0 \frac{R_t \cdot \alpha_t}{R_0 \cdot \alpha_0}$$

avec : e₀ : l'épaisseur initiale de la géomembrane en mm

Annexe 2 : Synthèse d'Aufrère (2008) sur les principales méthodes de dimensionnement et recommandations existantes

Méthode	Type	Sollicitations	GSY concernés	Paramètres d'entrée	Résultat
Koerner	Empirique (basé sur essais de poinçonnement hydrostatique)	Long terme	- GMB PEHD 1.5 mm - GTX NTA	- Hauteur des aspérités (Dmax granulats) - Angularité des granulats - Arrangement granulaire - Création de voûte dans matériau sus-jacent - Dégradation à long terme - Contrainte appliquée (hauteur de déchets) - Coef. de sécurité global → - Masse surfacique GTX et coef. de fluage ou - Masse surfacique GTX et coef. de fluage → - Coef. de sécurité global	
Fayoux	Empirique (basé sur essais de poinçonnement hydrostatique)	Court terme	- GMB PVC de 0.8 à 2.0 mm - GTX NTA	- Dmax et angularité des granulats des couches support et de recouvrement - Epaisseur de la couche de recouvrement - Caractéristiques des engins de mise en œuvre	- Epaisseur GMB et masse surfacique du GTX
Artières Duquennoy	Empirique (corrélation entre essais de performance et essais index)	Long terme	- GMB PVC et PEHD 1.5 mm - GTX NTA	- Contrainte appliquée - Angularité des granulats (20/40 uniquement)	- Résistance au poinçonnement statique du complexe GMB/GTX (pour granulats 20/40)
FLAC	Numerique	Long terme et court terme (validé seulement pour court terme)	-	- Modélisation GMB et GTX - Modélisation couche support - Contrainte appliquée	- Contrainte dans la géomembrane (à comparer à la contrainte admissible)
Allemagne	Recommandations	Long terme	- GMB PEHD 2.5 mm + granulats 16/32 mm - Matériaux du DEG	- Hauteur de déchets - Contrainte verticale appliquée	- Type de matériaux de protection et masse surfacique correspondante
Royaume-Uni	Expérimentale (essai cylindrique)	Long terme	- Matériaux du DEG	- Contrainte appliquée, durée de l'essai et température, granulats du DEG	- Validation ou non du matériau de protection
	Empirique (corrélation entre essai CBR et essai cylindrique) Expérimentale (essai cylindrique)	Long terme	- GMB PEHD - GTX NTA - Matériaux du DEG	- Contrainte appliquée (hauteur de déchets) - Dimensions des granulats (concassés) - Contrainte appliquée, durée de l'essai et température, granulats du DEG	- Résistance au poinçonnement CBR du GTX de protection - Validation ou non du matériau de protection

Méthode	Type	Sollicitations	GSY concernés	Paramètres d'entrée	Résultat
NAUE	Recommandations	Long terme	- GMB PEHD 2.5 mm + granulats 16/32 mm	- Contrainte appliquée (hauteur de déchets)	- Masse surfacique du GTX de protection
<i>Idem Royaume-Uni</i>					
Geofabrics Fibertex	D'après norme Danoise	Long terme	- GMB PEHD - GTX NTA	- Contrainte appliquée - Dimension des granulats	- Résistance au poinçonnement CBR, - Epaisseur à 2 kPa, et - Résistance au poinçonnement dynamique (chute de cône) du GTX de protection
Bidim	Empirique (basé sur les travaux d'Artières et Duquennoi)	Long terme	- GMB PVC et PEHD 1.5 mm - GTX NTA	- Epaisseur de la géomembrane - Diamètre et angularité des granulats de la couche de recouvrement - Contrainte appliquée (hauteur et poids des déchets) - Coefficient de sécurité souhaité - Hauteur des aspérités sous la GMB	- Position et masse surfacique du ou des GTX de protection
SETRA-LCPC	Recommandations pour les ouvrages pour les eaux de ruissellement routier	Long terme	- GMB de synthèse 1.5 mm env. - GMB bitumineuse 4 mm env. - GTX NTA	- Position du GTX de protection (sur ou sous la GMB, en fond d'ouvrage ou en talus) - Nature et granulométrie des matériaux en contact avec l'étanchéité	- Masse surfacique, - Résistance au poinçonnement statique, et - Résistance à la traction du GTX de protection
AFTES	Recommandations pour les tunnels	Long terme et court terme	-	- Type d'ouvrage - Hauteur du remblai - Granulométrie, forme, agressivité et classe du remblai (basée sur classification GTR)	- Composition du DEG (GMB et GTX) - Masse surfacique, - Résistance au poinçonnement statique, et - Résistance à la traction du GTX de protection
CFG	Recommandations pour les ISD	Couche de recouvrement composée de granulats non calcaires présentant une granulométrie étroite et élevée (20/40 par ex.) Epaisseur minimale de 50 cm pour circulation des engins pendant la mise en œuvre			

GTX : Géotextile
GMB : Géomembrane
NTA : Non tissé aiguilleté

Annexe 3 : Caractéristiques de la géomembrane portant la référence 05.031

Propriétés	Méthode de test	Unités	
Epaisseur	EN 1849-2	mm	2 ⁺ /- 5%
Densité	EN ISO 1183	g/m ³	≥0,940
Indice de Viscosité (190°C, 2.16 kg) (190°C, 5 kg)	EN ISO 1133	g/10 min	≤1,0 ≤3,0
Résistance à la rupture (*) Allongement à la rupture (*) Résistance à la limite élastique (*) Allongement à la limite élastique (*)	EN ISO 527-3, éprouvette catégorie 5	MPa % MPa %	34 (≥26) 900 (≥700) 19 (≥16) 10 (≥9)
Résistance au poinçonnement statique	EN ISO 12236	kN	6,0
Résistance à la déchirure	ISO 34-1/B (a)	N	300 (≥270)

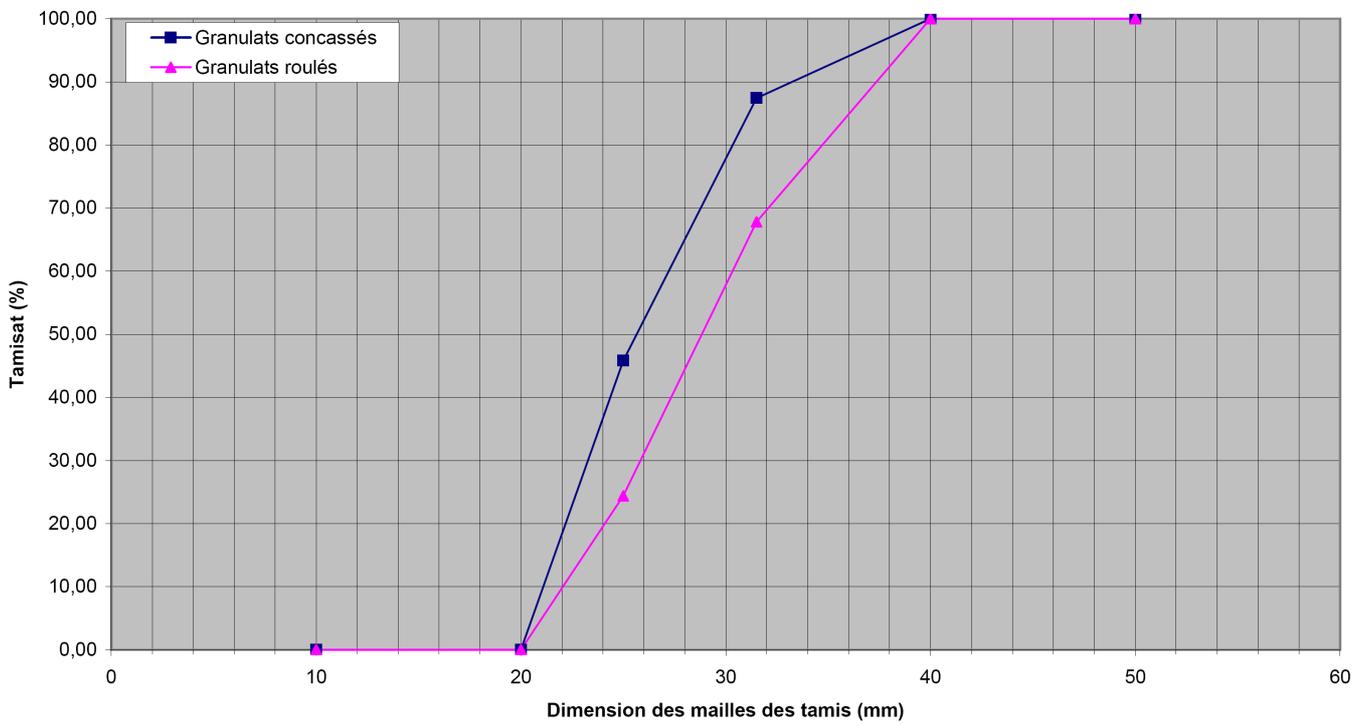
(*) Dans les 2 sens (production et transversal)

Annexe 4 : Caractéristiques de la géomembrane portant la référence 07.020

Propriétés	Méthode de test	Unités	
Epaisseur	ASTM D 5199	mm	2 ⁺ /- 5%
Densité	ASTM D 1505	g/m ³	≥0,942
Indice de Viscosité (190°C, 2.16 kg) (190°C, 5 kg)	ASTMD 1238	g/10 min	≥0,5/≤1,0 <3,0
Résistance à la rupture (*) Allongement à la rupture (*) Résistance à la limite élastique (*) Allongement à la limite élastique (*)	ASTM 6693	MPa % MPa %	>26 700 16 12
Résistance au poinçonnement statique	EN ISO 12236	kN	5,4
Résistance à la déchirure	ASTM D 1004S	N	280

Annexe 5 : Courbes granulométriques des granulats utilisés

Courbes granulométriques des granulats de la phase 2
(tamisés 20/40)



Annexe 6 : Détail des observations visuelles

Ref. GTX	Granulats	Importance des défauts visuels		
		Percements	Indentations	Déformations
Vierge	Roulé		2 C+	10 B+
	Concassé	1 limite	* B	
09.002	Roulé			1 A+ et *A
	Concassé		2 A+	*A
09.020	Roulé			** A
	Concassé		2B-	*A
10.004	Roulé			2 A+ et * A
	Concassé			1B et *A
10.005	Roulé		*A+	2 B
	Concassé			* A
10.006	Roulé			15 A+
	Concassé			15 A+
10.007	Roulé			15 A+
	Concassé		1 B	*A
10.008	Roulé			1B; 1A+ et *A
	Concassé		1A	*A
10.010	Roulé			1B- et *A
	Concassé			*A
10.011	Roulé			*A
	Concassé		*A-	*A-
10.014	Roulé			*A+
	Concassé		15 A	
10.017	Roulé			15 A+
	Concassé		1 B-; 15 A+	
10.018	Roulé			15 A+
	Concassé			1B; *A

* signifie une multitude de défauts

Les cellules en orange ont un défaut jugé inacceptable.

Annexe 7 : Tableau récapitulatif des résultats numériques des essais de traction bi-axiale effectués et graphiques contrainte-déformation correspondant

Résultats

GMB 05037

N°Eclato	Ref GTX	Cont max	Def à Cmax	masse
Aufrère 1	GMB vierge	31,5	67,7	115,657
Aufrère 4	GMB vierge	25,2	47,6	116,153
Aufrère 5	GMB vierge	30,5	64,9	115,51
Aufrère 14	GMB vierge	25,0	46,3	114,827
Aufrère 19	GMB vierge	25,6	54,6	115,797
Aufrère 20	GMB vierge	29,1	58,1	116,327
Aufrère 21	GMB vierge	29,6	62,6	115,871
Aufrère 30	GMB vierge	27,4	57,3	116,162
Aufrère 41	GMB vierge	28,7	62,5	115,654
Aufrère 44	GMB vierge	24,4	46,9	115,948
Aufrère 47	GMB vierge	31,7	68,6	122,586
Aufrère 60	GMB vierge	27,8	65,9	116,006
Aufrère 73	GMB vierge	27,0	57,2	115,111
Aufrère 74	GMB vierge	33,9	80,4	115,036
Guerret A5	GMB vierge	31,0	67,4	117,572
Guerret B4	GMB vierge	27,9	55,6	119,075
Guerret C0	GMB vierge	28,2	57,1	119,719
Guerret E0	GMB vierge	27,2	57,7	119,260
Guerret F1	GMB vierge	32,6	70,4	118,720
Guerret F4	GMB vierge	27,3	56,5	119,920
Guerret F8	GMB vierge	33,2	77,4	121,010
Guerret W1	GMB vierge	26,0	53,3	
09	GMB vierge	37,403	73,007	120,95
		moyenne	61,256	
		Ecart type	9,217	
		75 % valeur moyenne	45,942	

	N°Eclato	Ref GTX	Cont max	Def à Cmax	Protection
ES	04	sans GTX	19,680	20,149	insuffisante
	05	sans GTX	19,899	23,277	insuffisante
	07	09002 R	28,447	65,048	suffisante
	08	09002 C	28,703	67,775	suffisante
	12	10005 R	21,633	26,288	insuffisante
	13	10005 C	28,265	62,973	suffisante
	16	09020 C	22,317	29,130	insuffisante
	17	09020 R	65,668	122,118	suffisante
	18	10004 R	28,880	63,283	suffisante
	19	10004 C	27,127	60,003	suffisante

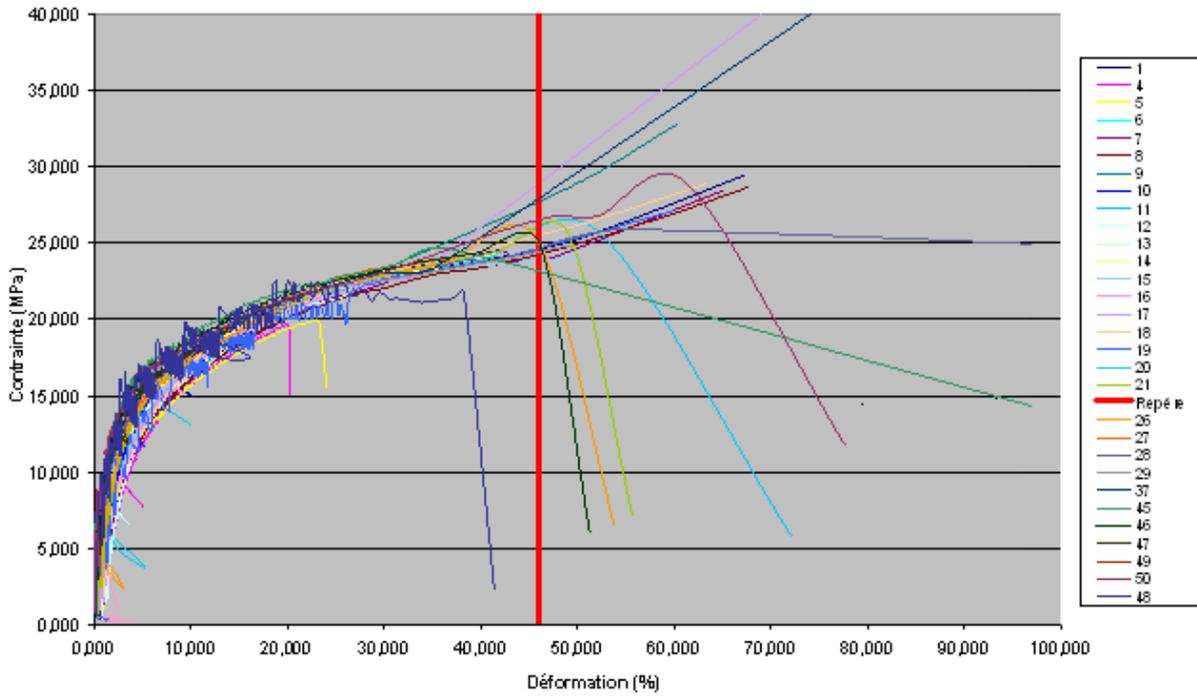
GMB 07020

N°Eclato	Ref GTX	Cont max	Def à Cmax	masse
01	GMB vierge	29,450	67,248	116,55
		moyenne	67,248	
		Ecart type	9,217	
		75 % valeur moyenne	45,942	

	N°Eclato	Ref GTX	Cont max	Def à Cmax	Protection
ES	10	10008 R	23,888	36,339	insuffisante
	11	10008 C	25,694	52,250	suffisante
	14	10007 C	24,820	52,931	suffisante
	15	10007 R	24,080	50,224	suffisante
	48	10006 R	21,832	38,235	insuffisante
	21	10006 C	25,697	48,983	suffisante
	26	10010 R	25,356	45,697	insuffisante
	27	10010 C	24,291	38,845	insuffisante
	28	10011R	25,893	55,685	suffisante
	29	10011C	24,856	49,364	suffisante
	37	10014 C	55,961	111,123	suffisante
	45	10018 C	24,637	36,681	insuffisante
	46	10018 R	25,001	46,069	suffisante
	47	10017 R	21,913	23,636	insuffisante
	49	10017 C	28,952	61,227	suffisante
	50	10014 R	28,952	61,227	suffisante

	N°Eclato	Ref GTX	Cont max	Def à Cmax	Protection
DC	03	10004	25,910	49,269	suffisante
	23	10007	24,141	35,829	insuffisante
	30	10008	23,683	38,061	insuffisante
	31	09020	22,821	33,069	insuffisante
	33	10010	23,746	38,496	insuffisante
	35	10014	32,181	72,683	suffisante
	40	10017	22,576	28,974	insuffisante
	41	10005	21,462	23,421	insuffisante
	42	09002	23,270	34,564	insuffisante
	43	10006	27,089	53,811	suffisante
	44	10011	24,982	43,582	insuffisante
	51	10018	34,792	69,258	suffisante

Essai d'Endommagement Statique



Essai DC

