

JUSTIFICATION D'UNE MODIFICATION DE LA NORME RELATIVE AU FROTTEMENT DES INTERFACES GÉOSYNTHÉTIQUES AU PLAN INCLINÉ

WHY AN ALTERATION OF THE STANDARD RELATED TO THE INCLINED PLANE IS REQUIRED FOR THE FRICTION OF GEOSYNTHETIC INTERFACES ?

Laurent BRIANÇON¹, Hugues GIRARD², Jean-Pierre GOURC³, Daniel POULAIN²

¹ Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France

² Cemagref, Bordeaux, France

³ LTHE, Grenoble, France

RÉSUMÉ – Une méthode de détermination de l'angle de frottement aux interfaces géosynthétiques en utilisant un plan incliné est décrite dans la norme européenne EN ISO 12957-2 (2005). Cette procédure normalisée ne semble pas être adaptée pour déterminer le frottement pour toute interface. Une nouvelle procédure est proposée dans cette communication, appelée « procédure en force ». L'angle déterminé par cette procédure n'est pas sensible aux conditions d'essais, il donne une valeur conservative du frottement et est plus représentatif des conditions réelles de mise en place. À partir de ces résultats, il nous semble raisonnable de proposer une révision de la norme.

Mots-clés : Plan incliné, frottement, interface, essais de laboratoire, norme.

ABSTRACT – A method for the determination of the friction angle of geosynthetic interfaces using an inclined plane is described by the European Standard EN ISO 12957-2 (2005). This "Standard Procedure" seems to be poorly suited for many interfaces. Herein, a new procedure is proposed, called the "Force Procedure". The angle determined with the "Force Procedure" is not sensitive to the conditions of the test, gives a conservative value for the friction and is more representative of real-world conditions, as it takes into account displacements observed in the field. Based on the results of this study, it seems reasonable to suggest a revision of the standard testing procedure.

Keywords: Inclined plane, friction, interface, laboratory test, standard.

1. Introduction

L'optimisation des ouvrages étanchés par un Dispositif d'Étanchéité par Géosynthétique (DEG) entraîne un raidissement maximal des talus. Ce raidissement engendre des problèmes de stabilité sur pentes et notamment à l'intérieur du complexe géosynthétique. Le calcul de la stabilité des dispositifs géosynthétiques sur pentes nécessite la caractérisation sous faible contrainte normale du frottement entre les différents matériaux qui les constituent. Plusieurs études ont montré que des essais au plan incliné étaient les plus adéquats pour cette caractérisation sous faible contrainte normale (Girard et al., 1990). Ces essais sont normalisés (EN ISO 12957-2, 2005). Ils consistent à déterminer l'angle de frottement du complexe sol/GSY ou GSY/GSY testé en mesurant l'angle pour lequel le boîtier supérieur s'est déplacé de 50 mm (u_{50}) lorsque le plan est incliné à vitesse constante. Cependant, il a été démontré (Gourc et Reyes-Ramirez, 2004) que cette « procédure standard » entraîne souvent une surestimation de l'angle de frottement et plusieurs cas de ruptures observées sur site tendraient à le confirmer.

En 2002, Briançon et al. ont proposé une variante du protocole d'essai dite « procédure en force » : cette nouvelle procédure d'essai a été validée sur les nombreuses interfaces testées depuis 2002. Cette procédure consiste à déterminer l'angle de frottement à partir du bilan des forces après glissement en mesurant la force nécessaire pour retenir le boîtier supérieur. Cette procédure a été appliquée à différentes interfaces donnant lieu à des glissements « rapides » ou « graduels » et a permis de déterminer l'angle de frottement avec une très bonne répétabilité.

Cette procédure sera proposée pour modifier la norme EN ISO 12957-2, 2005 afin d'évaluer plus justement et sécuritairement l'angle de frottement aux interfaces géosynthétiques à l'aide du plan incliné.

2. État de l'art

2.1. « Procédure standard » décrite par la norme

La norme EN ISO 12957-2 (2005) décrit une méthode pour déterminer l'angle de frottement δ aux interfaces géosynthétiques sous faible contrainte normale à l'aide d'un plan incliné. Le déplacement u du boîtier supérieur est mesuré en fonction de l'inclinaison β (Figure 1) du plan. Cette méthode d'essai est avant tout un essai de performance qui doit être conduit en utilisant les sols spécifiques du site mais peut également être utilisée en tant qu'essai de caractérisation avec un sable normalisé pour assurer la surcharge. L'appareil est constitué d'une base inclinable de dimensions minimum normalisées (longueur dans la direction du glissement $l_i = 0,4$ m, largeur $w_i = 0,325$ m) sur laquelle glisse un boîtier supérieur ($l_s = 0,3$ m, $w_s = 0,3$ m) rempli de sol. La vitesse d'inclinaison doit rester constante pendant l'essai et peut être prise égale à $d\beta/dt = 3,0 \pm 0.5$ degré/min. Le sol contenu dans le boîtier supérieur doit appliquer une charge répartie $W \cdot \cos\beta$ sur le complexe géosynthétique égale initialement ($\beta=0$) à $5,0 \pm 0.1$ kPa. Les parois amont et aval du boîtier supérieur peuvent être préalablement inclinées à l'angle de glissement prévu.

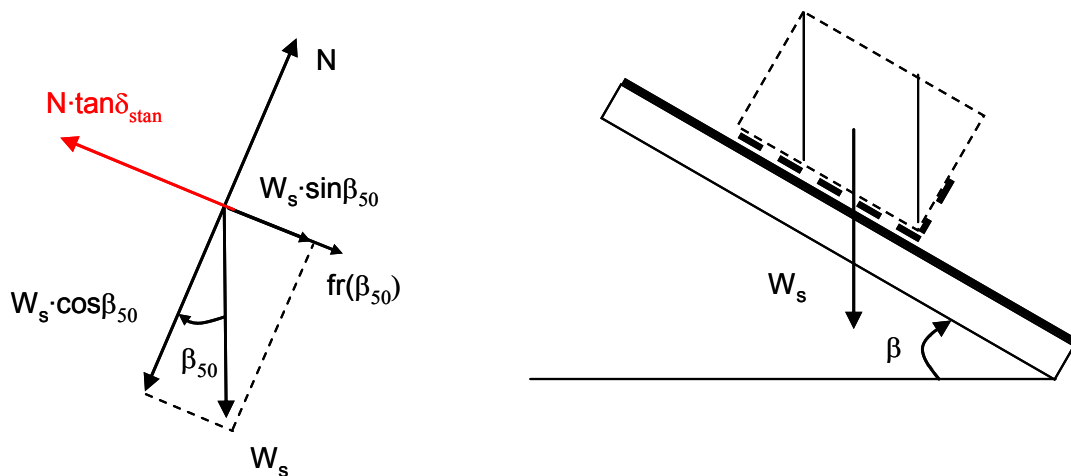


Figure 1. Bilan des forces appliquées à l'interface pour une inclinaison β_{50} du plan.

L'angle de frottement δ_{stan} est déterminé à partir du bilan des forces appliquées à l'interface sol-GSY correspondant à l'inclinaison β_{50} pour laquelle le boîtier supérieur s'est déplacé de $u_{50} = 50$ mm (équations 1a et 1b) :

$$W_s \cdot \sin \beta_{50} + fr(\beta_{50}) - N \cdot \tan \delta_{stan} = 0 \quad (1a)$$

$$W_s \cdot \cos \beta_{50} = N \quad (1b)$$

d'où :

$$\tan \delta_{stan} = \frac{W_s \cdot \sin \beta_{50} + fr(\beta_{50})}{W_s \cdot \cos \beta_{50}} \quad (2)$$

où W_s est le poids du sol contenu dans le boîtier supérieur, $fr(\beta_{50})$ la force nécessaire pour retenir le boîtier supérieur vide pour une inclinaison β_{50} du plan, β_{50} l'inclinaison du plan pour laquelle le boîtier supérieur s'est déplacé de 50 mm. On notera que ces équations, obtenues en statique, ne sont pas rigoureuses du fait du mouvement du boîtier.

2.2. Analyse du glissement

Le glissement aux interfaces géosynthétiques peut se décomposer en trois phases (Gourc et Reyes Ramirez, 2004) :

- phase 1 (phase statique, $\beta < \beta_0$) : le boîtier supérieur est immobile jusqu'à ce que le plan atteigne un angle critique β_0 initiant le glissement,
- phase 2 (phase transitoire, $\beta_0 < \beta < \beta_s$) : le boîtier supérieur se déplace à accélération croissante.

- phase 3 (phase dynamique, $\beta = \beta_S$) : le boîtier se déplace avec une accélération constante, même si l'inclinaison du plan n'augmente plus.

Pitanga et al. (2009) ont mis en évidence que le glissement peut se produire sous différentes formes :

- le glissement rapide (Figure 2a), dans ce cas la phase 2 est inexistante ($\beta_0 = \beta_S$),
- le glissement graduel (Figure 2b), le boîtier supérieur se déplace lentement avec l'inclinaison du plan ou a un comportement de type « collé-glissé » (stick-slip).

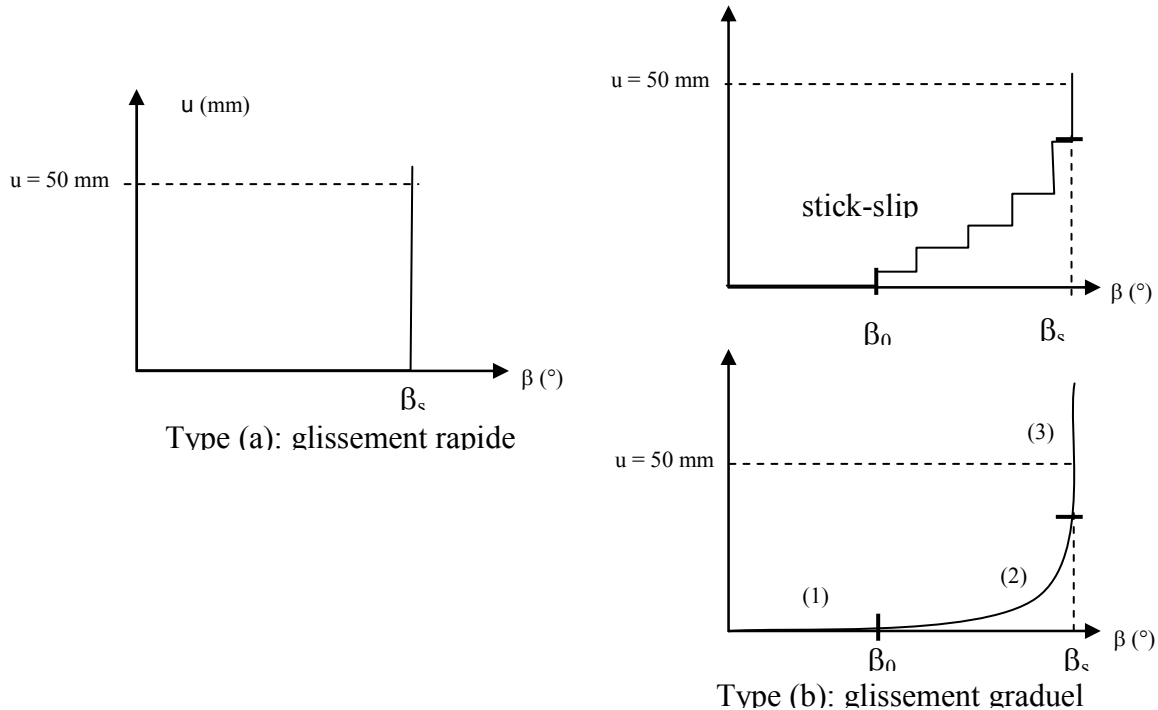


Figure 2. Différents cas de glissement.

Dans le cas du glissement graduel, la norme semble ne pas être adaptée, notamment lorsque la phase 2 est très longue (Gourc et Reyes Ramirez, 2004). Ces auteurs ont aussi montré que, même pour des glissements rapides, la méthode de la norme n'est pas adaptée puisqu'elle définit l'angle de frottement en conditions statiques (équations 1 & 2) alors que les conditions d'essais sont dynamiques.

3. Nouvelle procédure d'essai

Comme il a été montré dans la section 2, la procédure standard de détermination de l'angle de frottement n'est pas satisfaisante et devrait être corrigée par une prise en compte de l'accélération. La mesure de cette accélération étant délicate, une nouvelle procédure d'essai a été développée. En 2002, Briançon et al. ont proposé une variante à l'essai normalisé pour déterminer l'angle de frottement aux interfaces géosynthétiques sous faible contrainte normale à l'aide d'un plan incliné. Cette méthode consiste à mesurer la force nécessaire pour retenir le boîtier supérieur après que le glissement se soit produit et pour un déplacement prédéfini du boîtier supérieur. Cette méthode est appelée « procédure en Force » pour se différencier de la « procédure standard » ou « procédure en déplacement » définie par la norme. Depuis 2002, les essais effectués sur de nombreuses interfaces avec les deux procédures ont mis en évidence l'intérêt d'utiliser la procédure en force et ont permis de la valider.

3.1. Appareillage

Le plan incliné (Briançon, 2001) est constitué d'un boîtier inférieur inclinable sur lequel repose un boîtier supérieur. Ce dernier est muni d'un système de guidage et peut se déplacer sur des rails disposés de part et d'autre du boîtier inférieur. Les deux boîtiers peuvent être remplis de sol sur une épaisseur h , leurs dimensions ($l_i = 2,0$ m ; $w_i = 1,2$ m et $h_i = 0,3$ m pour le boîtier inférieur ; $l_s = 1,0$ m ; $w_s = 1,0$ m et $h_s = 0,5$ m pour le boîtier supérieur) permettent de réaliser des essais sur des éprouvettes de géosynthétiques de grandes tailles. La surface de frottement testée peut atteindre 1 m².

Les géosynthétiques sont disposés entre les deux boîtiers, selon l'interface à tester : ils peuvent être fixés au boîtier supérieur ou en amont du boîtier inférieur à des mors d'ancrage couplés avec des capteurs de forces permettant de mesurer les tensions dans les géosynthétiques. L'espace réglable entre les deux boîtiers permet de tester des dispositifs géosynthétiques d'épaisseur variable pouvant être constitués de un à quatre géosynthétiques. Un treuil motorisé, piloté informatiquement, gère l'inclinaison du plan à des vitesses de montée variables et contrôlées (0,5 à 3,5 degré/min).

3.2. Description de la procédure en force

Le boîtier supérieur est attaché au cadre fixe de l'appareillage par un câble initialement non tendu couplé à un capteur de force. Après un déplacement u_{lim} prédéterminé du boîtier supérieur (correspondant à une inclinaison du plan $\beta = \beta_{lim}$), le câble est tendu et la force $F(\beta)$ nécessaire pour retenir le boîtier supérieur est mesurée en fonction de l'inclinaison ($\beta > \beta_{lim}$). L'essai comporte trois étapes (Figure 3) :

- la première étape ($\beta < \beta_0$) correspond à l'état statique du boîtier supérieur,
- la deuxième étape ($\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{lim}$) correspond à un état transitoire lorsque le boîtier supérieur se déplace rapidement ou graduellement jusqu'à que le câble le retenant soit tendu correspondant à un déplacement u_{lim} ,
- la troisième étape ($\beta > \beta_{lim}$) correspond à un état quasi statique du boîtier supérieur retenu par la force $F(\beta)$ du câble tendu.

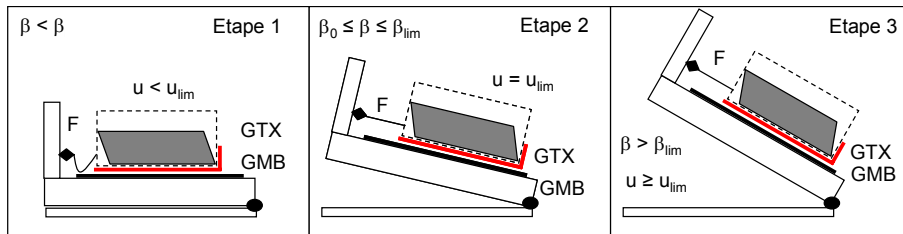


Figure 3. Différentes étapes de la procédure en force.

Le bilan des forces (Figure 4) effectué pour l'étape 1 (conditions statiques) et l'étape 3 (conditions pseudo-statiques) amène aux équations d'équilibres suivantes :

$$W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) - N \cdot \tan \delta - F(\beta) = 0 \quad (3a)$$

$$W_s \cdot \cos \beta = N \quad (3b)$$

$$\tan \delta = \frac{W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos \beta} \quad (4)$$

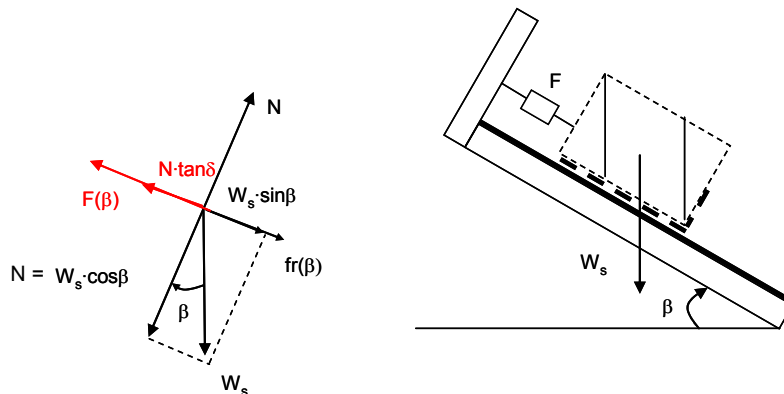


Figure 4. Bilan des forces pour la procédure en force.

Pour les deux phases statiques, δ représente l'angle de frottement à l'interface.

Durant l'étape transitoire, lorsque le boîtier supérieur glisse, le bilan des forces est effectué en conditions dynamiques :

$$W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) - N \cdot \tan \delta - F(\beta) = W_s \cdot \frac{\gamma}{g} \quad (5a)$$

$$W_s \cdot \cos \beta = N \quad (5b)$$

$$\tan \delta = \frac{W_s \cdot (\sin \beta - \gamma / g) + fr(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos \beta} \quad (6)$$

Comme l'accélération est difficilement mesurable, il n'est pas possible de déterminer la valeur du frottement correspondant à cette phase.

3.3. Application de la procédure en force

3.3.1 Présentation de résultats

Comme l'angle de frottement ne peut pas être donné pour la phase transitoire, seul le paramètre λ peut être évalué tout au long de l'essai à partir des mesures du déplacement du boîtier supérieur et de la force pour retenir ce dernier après déplacement :

$$\tan \lambda = \frac{W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos \beta} \quad (7)$$

$$\text{Pour les étapes 1 et 3, } \tan \lambda = \tan \delta \quad (8a)$$

$$\text{Pour l'étape 2, } \tan \lambda = \tan \delta + \gamma / (g \cdot \cos \beta) \quad (8b)$$

3.3.2 Interfaces testées pour valider la procédure en force

La procédure en Force a été validée sur de nombreuses interfaces. Nous présenterons dans cette communication les résultats relatifs aux interfaces des géosynthétiques suivantes :

- quatre géomembranes : GMB_{PVC}, GMB_{PEHD}, GMB_{PP}, GMB_{EPDM},
- quatre géotextiles : un non tissé aiguilleté renforcé par des fils en PET (noté GTX_{nta(R)}), deux non tissés aiguilletés (notés GTX_{nta(P1)} et GTX_{nta(P2)}) et un non tissé thermolié noté GTX_{ntt}.

Quelques propriétés de ces produits sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Quelques propriétés des géosynthétiques utilisés.

Géotextiles					
Caractéristiques	Unité	GTX _{nta(R)}	GTX _{nta(P1)}	GTX _{nta(P2)}	GTX _{ntt}
Épaisseur sous 2 kPa	mm	1,45	2,5	2,8	0,59
Masse surfacique	g/m ²	260	400	300	220
Géomembranes					
Caractéristiques	Unité	GMB _{PVC}	GMB _{PEHD}	GMB _{PP}	GMB _{EPDM}
Épaisseur sous 2 kPa	mm	1,5	2	1	1,14

3.3.3 Application dans le cas d'un glissement rapide

Le cas d'un glissement rapide est présenté à la figure 5 pour une interface entre une géomembrane PEHD GMB_{PEHD} et un géotextile non tissé aiguilleté renforcé GTX_{nta(R)}. Dans l'exemple proposé (Figure 5), la longueur du câble a été ajustée pour obtenir un déplacement $u_{lim} = 100$ mm du boîtier supérieur, cette valeur n'ayant pas d'influence sur la valeur de l'angle de frottement résiduel déterminé sous réserve qu'elle soit suffisamment grande pour que le frottement soit totalement mobilisé. (cf 3.3.6).

Étape 1

Durant cette étape, ($\beta < \beta_0$), la mobilisation du frottement est partielle, étant donné que les efforts moteurs ($W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta)$) sont équilibrés par les efforts résistants ($W_s \cdot \cos \beta \cdot \tan \delta$) où le frottement mobilisé δ croît avec l'inclinaison β . La valeur de $\lambda = \delta$ augmente pour atteindre un pic correspondant au début de la mise en tension du câble retenant le boîtier supérieur. Il est possible de définir un premier angle de frottement δ_0 correspondant à l'initialisation du glissement ($u > 0$) pour $\beta = \beta_0$:

$$\tan \delta_0 = \frac{W_s \cdot \sin \beta_0 + fr(\beta_0)}{W_s \cdot \cos \beta_0} \quad (9)$$

Dans le cas du glissement rapide, la fin de l'étape 1 correspond à la valeur pic λ_{pic} . La force $F(\beta)$ augmente rapidement lorsque le déplacement u débute. Dans l'exemple présenté (Figure 5), $\beta_0 = 11,5$ degrés et $\delta_0 = 15,7$ degrés.

Étape 2

Cette étape n'est pas utilisée pour la détermination du frottement puisque l'accélération γ (équation 6) n'est pas mesurée.

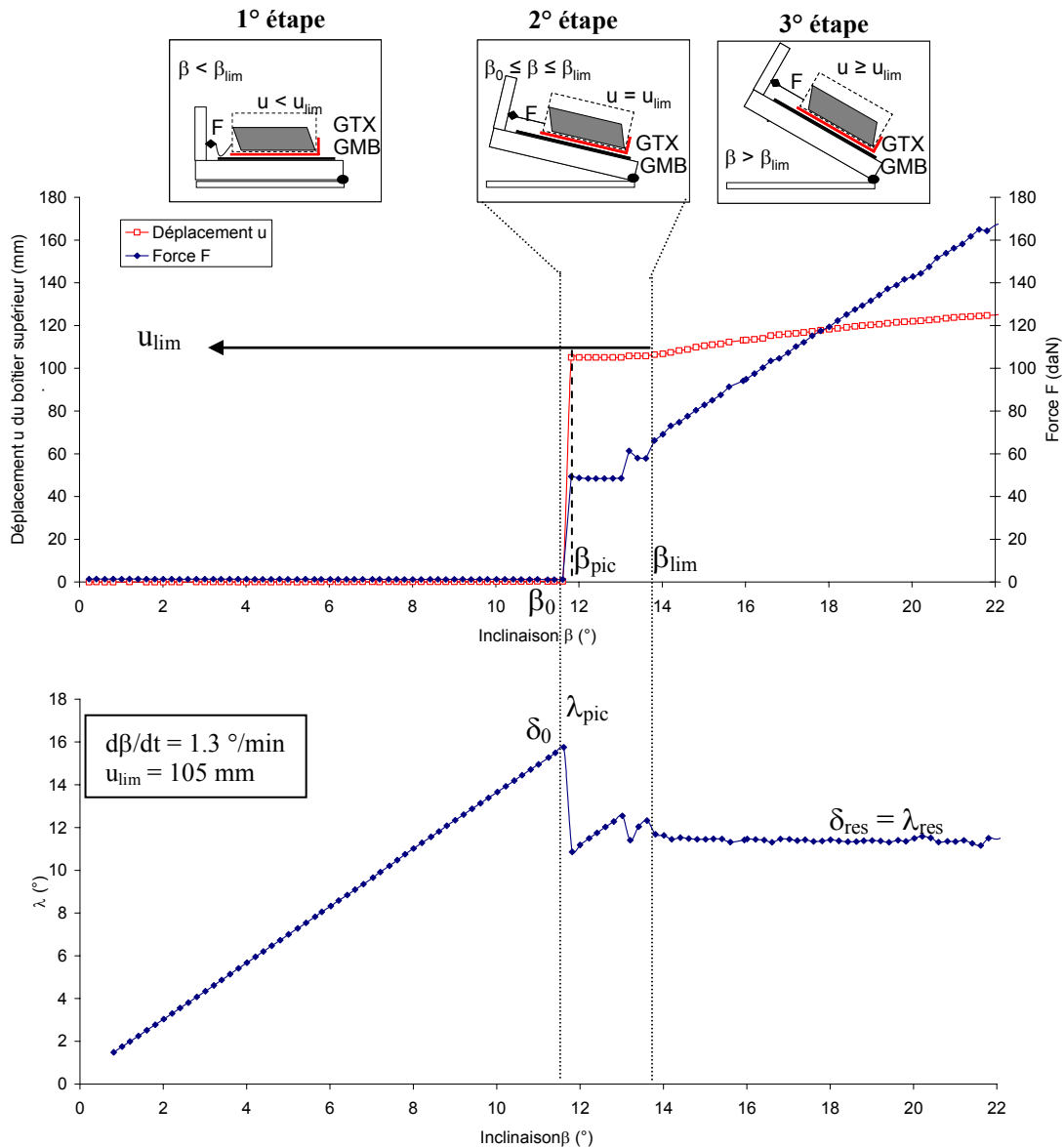


Figure 5. Exemple d'application de la procédure en Force dans le cas d'un glissement rapide.

Étape 3

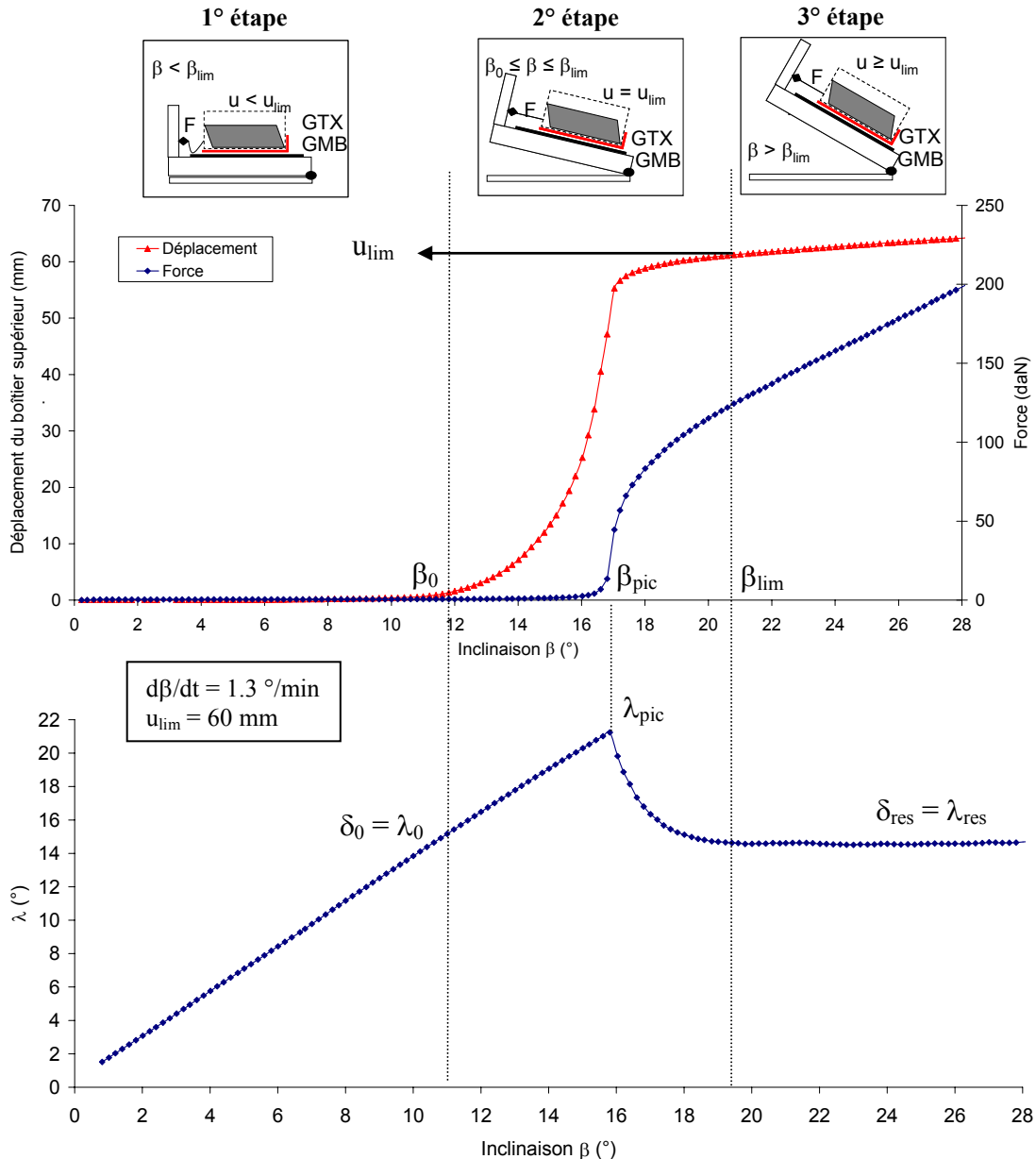
Cette étape débute à la fin du glissement ($\beta = \beta_{lim}$), les efforts moteurs deviennent plus grands que les efforts résistants de frottement mobilisables. Le frottement est alors entièrement mobilisé. La force $F(\beta)$ augmente pour équilibrer la différence entre les efforts moteurs et les efforts résistants de frottement. On note une légère augmentation du déplacement ($u > u_{lim}$) qui correspond à l'élongation du câble mais qui n'influence pas le résultat. La courbe $\lambda = f(\beta)$ atteint un palier pour lequel l'angle de frottement résiduel δ_{res} est déterminé à partir de l'équation (10) :

$$\tan \delta_{res} = \frac{W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos \beta} \quad (10)$$

Dans l'exemple présenté (Figure 5), $\delta_{res} = 11,4$ degrés.

3.3.4 Application dans le cas d'un glissement graduel

La figure 6 présente le cas d'un glissement graduel pour une interface entre une géomembrane PP GMB_{PP} et le même géotextile GTX_{nta(R)} utilisé pour l'exemple du glissement rapide. Dans cet exemple, le déplacement du boîtier supérieur a été ajusté à $u_{lim} = 60$ mm. Comme dans l'exemple précédent, l'étape 2 est définie pour $\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{lim}$. Cependant, à la différence du glissement rapide, la force $F(\beta)$ augmente graduellement à partir de l'initialisation du glissement pour $\beta = \beta_0$.



Étape 1

L'angle β_0 est plus difficile à définir dans le cas du glissement graduel, il peut être choisi arbitrairement pour un déplacement u égal à 1 ou 2 mm. L'angle de frottement correspondant peut être calculé (équation 9), pour cet exemple : $\beta_0 = 10,8$ degrés, $\delta_0 = 14,9$ degrés.

Étape 2

Comme dans l'exemple précédent, l'étape 2 est définie pour $\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{lim}$. Cependant, à la différence du glissement rapide, la force $F(\beta)$ augmente graduellement à partir de l'initialisation du glissement pour $\beta =$

β_0 . Le câble devient tendu pour $\beta = \beta_{pic}$ correspondant à la valeur maximale λ_{pic} du paramètre λ . A la différence du glissement rapide, $\beta_0 < \beta_{pic} < \beta_{lim}$.

Étape 3

Comme pour le cas précédent, il est possible de déterminer la valeur du frottement δ_{res} après stabilisation du dispositif lorsque la courbe atteint un palier pour $\beta > \beta_{lim}$. À partir de l'équation 10 : $\delta_{res} = \lambda_{res} = 14,5$ degrés.

3.3.5 Choix du paramètre définissant le frottement

La procédure en force permet donc de déterminer deux angles de frottement δ_0 et δ_{res} . À part dans le cas du glissement rapide, il est difficile de déterminer l'angle de frottement δ_0 correspondant à l'initialisation du déplacement notamment lorsque le glissement est très lent. Cet angle dépend en plus de la vitesse d'inclinaison du plan et n'est donc pas un paramètre intrinsèque à l'interface testée. Nous proposons donc de définir le frottement à l'interface avec l'angle de frottement résiduel δ_{res} qui est le seul paramètre intrinsèque à l'interface mesuré avec la procédure en Force.

3.3.6 Influence des conditions d'essai

Pour les deux types de glissement, le déplacement réglé pour le boîtier supérieur u_{lim} n'a pas d'influence sur la valeur de l'angle frottement δ_{res} déterminé avec la procédure en Force (Figure 7), même si l'étape 2 ($\beta_0 \leq \beta \leq \beta_{lim}$) est plus grande lorsque la valeur de u_{lim} augmente. En conséquence, il est préférable de choisir une petite valeur de u_{lim} en particulier pour les glissements graduels afin de réduire le plus possible l'étape 2 pour laquelle l'angle de frottement ne peut pas être déterminé. Il faut néanmoins que la valeur u_{lim} choisie soit suffisante pour que le frottement soit entièrement mobilisé avant l'étape 3. Les nombreux essais réalisés ont permis de définir un déplacement adapté à toutes les interfaces testées $u_{lim} = 20$ mm.

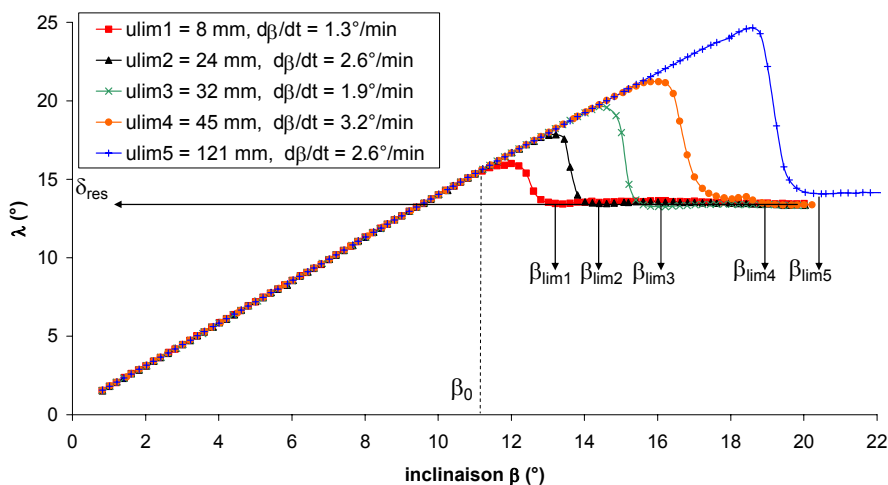


Figure 7. Influence de u_{lim} sur δ_{res} dans le cas d'un glissement graduel.

Pour chaque interface testée, les essais ont été réalisés pour quatre vitesses d'inclinaison du plan $\frac{d\beta}{dt} = 1,3^\circ/\text{min}; 1,9^\circ/\text{min}; 2,6^\circ/\text{min}; 3,2^\circ/\text{min}$. Pour les deux types de glissement, cette vitesse d'inclinaison n'a pas d'influence sur δ_{res} (Figure 8).

Lorsqu'une même interface est testée successivement plusieurs fois (Figure 9), même si la valeur de l'angle de pic est modifiée, pour les deux types de glissement, l'angle résiduel n'est pas sensible à la répétition des essais sauf si l'un des deux géosynthétiques s'endommage à la suite du glissement. Une interface testée plusieurs fois est plus représentative des conditions réelles de mise en œuvre in situ puisque les nappes géosynthétiques peuvent subir plusieurs déplacements lors de leur installation avant que la couche de sol supérieure soit mise en place.

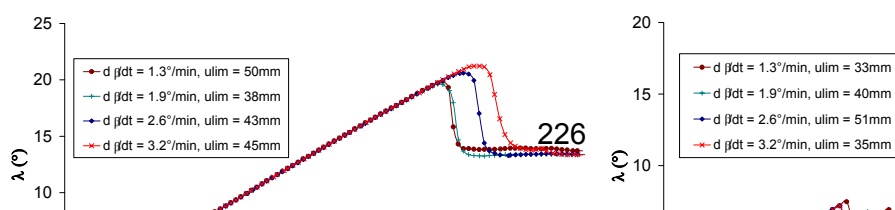
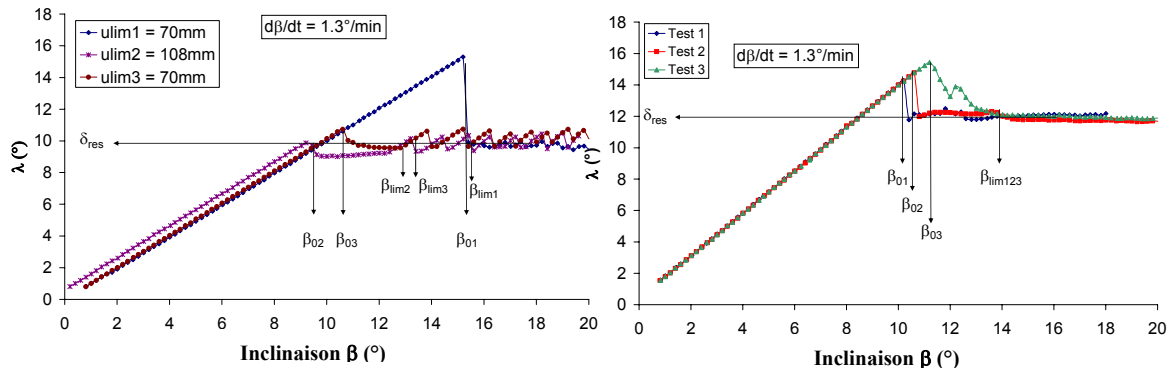


Figure 8. Influence de la vitesse d'inclinaison sur δ_{res} .Figure 9. Influence de la répétition des essais pour une même interface sur δ_{res} .

3.3.7 Comparaison entre δ_{stan} et δ_{res}

La comparaison entre les angles de frottement déterminés à partir de la procédure standard et déterminés à partir de la procédure en Force montre que la procédure en Force donne des valeurs systématiquement inférieures à celles de la norme (Tableau 2). La procédure en Force donne donc des résultats qui vont dans le sens de la sécurité. De plus cette méthode est rigoureuse d'un point de vue mécanique, ce qui n'est pas le cas de la procédure standard.

Tableau 2. Comparaison entre δ_{stan} et δ_{res}

δ_{stan} / δ_{res}	GTX _{nwn} (P1)	GTX _{nwn} (R)	GTX _{nwh}
GMB _{PVC}	21,5° / 20°	20° / 17°	17° / 13,5°
GMB _{HDPE}	10,5° / 7°	15,5° / 11,5°	9,5° / 8,5°
GMB _{EPDM}	25° / 20°	27° / 20°	20,5° / 13,5°

4. Conclusion

Des essais au plan incliné ont montré que la procédure standard surestimait l'angle de frottement mesuré en particulier pour des interfaces donnant lieu à un glissement graduel. De plus, cette procédure s'avère peu rigoureuse puisqu'elle propose une approche statique pour des conditions d'essais qui sont en fait dynamiques. Une nouvelle procédure a donc été développée pour pallier les difficultés rencontrées en utilisant la procédure normalisée.

Cette procédure, appelée « procédure en Force » peut paraître complexe, mais se révèle d'exploitation aisée. Elle semble être adaptée à tout type d'interfaces géosynthétiques et quelque soit le type de glissement (rapide ou graduel). Cette procédure permet de déterminer plusieurs angles de frottement mais nous proposons de retenir uniquement l'angle de frottement résiduel pour les raisons suivantes :

- cet angle n'est pas sensible aux conditions d'essais,

- cet angle est le seul à être un paramètre intrinsèque de l'interface testée parmi les différents angles de frottement qui peuvent être déterminés à partir de la procédure en Force,
- cet angle donne une valeur conservative du frottement,
- les conditions expérimentales pour déterminer cet angle sont faciles à appliquer et donc reproductibles.

Le choix de cet angle de frottement est aussi justifié par les observations in situ puisqu'il est le plus représentatif des conditions de mise en place des nappes géosynthétiques en conditions réelles.

À partir de toutes ces considérations, nous proposerons une révision de la norme EN ISO 12957-2 (2005) pour prendre en compte les résultats de notre étude et pour que la procédure en Force soit la seule proposée dans la norme. Quelques points devront encore être discutés dans le but de proposer la procédure la plus adaptée, notamment en ce qui concerne le choix du déplacement du boîtier supérieur u_{lim} .

5. Références bibliographiques

- Briançon L. (2001). Stabilité sur pentes des dispositifs géosynthétiques - Caractérisation du frottement aux interfaces et application. Thèse ès science, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 200 pages.
- Briançon L., Girard H., Poulain D. (2002). Slope stability of lining systems - Experimental modelling of friction at geosynthetic interfaces. *Geotextiles and Geomembranes* 20 (3), 147-172.
- EN ISO 12957-2 (2005). Geosynthetics - Determination of friction characteristics, Part 2: Inclined Plane test. Brussels: European Committee for Standardization.
- Girard H., Fischer S., Alonso E. (1990). Problems of friction posed by the use of geomembranes on dam slopes - examples and measurements. *Geotextiles and Geomembranes* 9 (2), 129-143.
- Gourc J. P., Reyes Ramirez R. (2004). Dynamics-based interpretation of the interface friction test at the inclined plane. *Geosynthetics International* 11 (6), 439-454.
- Pitanga H.N., Gourc J.P., Vilar O.M. (2009). Interface shear strength of geosynthetics: evaluation and analysis of inclined plane test. *Geotextiles and Geomembranes* 27 (6), 435-446.