Détermination des propriétés de frottement résiduel des interfaces géosynthétiques par un essai au plan incliné

Guillaume Stoltz, Daniel Poulain, Roland Gallo

▶ **To cite this version:**

Guillaume Stoltz, Daniel Poulain, Roland Gallo. Détermination des propriétés de frottement résiduel des interfaces géosynthétiques par un essai au plan incliné. 9èmes Rencontres Géosynthétiques, Apr 2013, Dijon, France. p. 305 - p. 312. hal-00857495

HAL Id: hal-00857495
https://hal.science/hal-00857495

Submitted on 3 Sep 2013

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.

Sommaire

DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DE FROTTEMENT RÉSIDUEL DES INTERFACES GÉOSYNTHÉTIQUES PAR UN ESSAI AU PLAN INCLINÉ

ASSESSMENT OF RESIDUAL FRICTION PROPERTIES OF GEOSYNTHETICS INTERFACES FROM AN INCLINED PLANE TEST

Guillaume STOLTZ[1], Daniel POULAIN[2], Roland GALLO[1]
[1] *IRSTEA - centre d'Antony, Antony, France*
[2] *IRSTEA - centre de Bordeaux, Cestas, France*

RÉSUMÉ – La norme NF EN ISO 12957-2 décrit une procédure d'essai utilisant un plan incliné pour déterminer l'angle de frottement d'une interface incluant au moins une surface de type géosynthétique. Cette étude propose une procédure d'essai au plan incliné qui permet de déterminer l'angle de frottement correspondant à une résistance de palier, ce que ne permet pas la norme en vigueur bien que ce paramètre soit requis par des normes de dimensionnement (ex. XP G 38-067).
Mots-clés : géosynthétique, interface, plan incliné, frottement, comportement « pic-palier »

ABSTRACT – The standard NF EN ISO 12957-2 (AFNOR, 2005) describes a testing procedure using an inclined plane device to determine the friction angle of an interface including at least a geosynthetic interface. This study presents a new testing procedure with an inclined plane device that permits to determine a friction angle corresponding to a plateau resistance which is not possible using the standard procedure, although this parameter is require by design standard (e.g. XP G 38-067, AFNOR, 2010).
Keywords: geosynthetic, interface, inclined plane, friction, "pic-plateau" behaviour.

1. Introduction

Le dimensionnement de systèmes géosynthétiques sur pente nécessite les propriétés de frottement aux interfaces sol-géosynthétique et/ou géosynthétique-géosynthétique. Par exemple, les angles de frottement d'interfaces incluant des géosynthétiques sont utilisés par la Norme XP G 38-067 (AFNOR, 2010) qui permet de dimensionner un système géosynthétiques sur pente pour assurer la stabilité d'une couche mince de sol sus-jacent.

La mesure des angles de frottement aux interfaces géosynthétiques peut être réalisée par l'essai de cisaillement direct ou bien par l'essai au plan incliné. Il a été montré que l'essai au plan incliné, selon la norme NF EN ISO 12957-2 (AFNOR, 2005), est plus approprié pour la détermination des angles de frottement sous des contraintes de confinement inférieures à 10 kPa (Izgin et Wasti, 1998 ; Palmeira et al., 2002 ; Reyes-Ramirez et Gourc, 2003). Néanmoins, de récentes études montrent que cet essai peut conduire à la détermination d'une valeur non conservative de l'angle de frottement. En effet, Pitanga et al. (2009) ont montré que l'angle de frottement correspondant à l'initiation du glissement de l'interface et l'angle de frottement dynamique de l'interface (caractérisé par un glissement à accélération constante) étaient généralement inférieurs à l'angle de frottement obtenu selon la norme NF EN ISO 12957-2 de l'essai au plan incliné. Cependant, Pitanga et al. (2009) ne concluent pas sur l'angle de frottement à retenir à partir de l'essai au plan incliné et soulignent que cette question reste en suspens. Briançon et al. (2011) ont proposé une procédure modifiée de l'essai au plan incliné qu'ils ont nommée « procédure en force ». À partir de cette procédure, ils obtiennent une valeur d'angle de frottement qu'ils considèrent conservative par rapport à l'angle de frottement obtenu à partir de l'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2. Enfin, Stoltz et al. (2012) ont proposé une procédure d'essai au plan incliné qui détermine l'angle de frottement résiduel aux interfaces géosynthétiques.

Cette étude a pour objectif de comparer la procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2 à la procédure d'essai de frottement résiduel proposée par Stoltz et al. (2012). Une interface géomembrane-géotextile a été testée dans cet objectif.

2. Procédures d'essai au plan incliné

2.1. Procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2

La norme NF EN ISO 12957-2 est une méthode de détermination de l'angle de frottement des interfaces géosynthétiques ou sol-géosynthétiques, sous contrainte faible, par un dispositif de type plan incliné. Le principe est de mesurer l'inclinaison β_{50} du plan (figure 1), qui augmente à vitesse constante durant l'essai, lorsque le boîtier supérieur, rempli de sol pour appliquer la contrainte de confinement σ, glisse d'un déplacement δ de 50 mm. La vitesse d'inclinaison du plan requise est égale à 3,0 ± 0,5 degrés par minute ; la contrainte normale initiale (β = 0) confinant l'interface est égale à 5,0 ± 0,1 kPa ; la longueur et la largeur de l'interface testée doivent être au moins égales à 300 mm. Il est à noter que la contrainte normale varie pendant l'essai ($\sigma = \sigma_0 \cos\beta$). Pour obtenir une contrainte uniforme sur toute la surface de l'éprouvette testée, les parois du boîtier supérieur doivent pouvoir être inclinées avant le début de l'essai de façon à ce que leur inclinaison corresponde à β_{50}. L'angle de frottement φ_{50} de l'interface étudiée est calculé suivant l'équation (1) déduite du bilan des forces de la figure 1 :

$$\tan\varphi_{50} = \left(\frac{T}{N}\right)_{50} = \frac{W_s \cdot \sin\beta_{50} + fr(\beta_{50})}{W_s \cdot \cos\beta_{50}} \qquad (1)$$

avec W_S le poids du sol contenu dans le boîtier supérieur, β_{50} l'inclinaison du plan pour laquelle le boîtier supérieur s'est déplacé de 50 mm et $fr(\beta_{50})$ la force nécessaire pour retenir le boîtier supérieur vide pour une inclinaison β_{50} du plan.

Trois essais sur éprouvettes vierges sont requis et l'angle de frottement de l'interface étudiée est calculé par la moyenne arithmétique des angles φ_{50} de chaque essai. Il est important de noter que l'équation (1) est issue d'un bilan des forces statiques alors que les conditions sont dynamiques ; la force dynamique engendrée par l'accélération du plan est négligée. C'est l'une des raisons pour laquelle des auteurs comme Reyes-Ramirez et Gourc (2003) ont indiqué que la méthode de la norme NF EN ISO 12957-2 n'était pas adaptée pour déterminer l'angle de frottement d'une interface impliquant des géosynthétiques.

2.2. Procédure d'essai de frottement résiduel

Cette procédure d'essai, proposée par Stoltz et al. (2012), vise à déterminer l'angle de frottement résiduel des interfaces incluant des surfaces géosynthétiques. Elle consiste à mesurer, par l'intermédiaire d'un ressort, la force F nécessaire pour retenir le boîtier supérieur dès l'initiation du glissement. La force F est reliée au déplacement δ du boîtier supérieur par la relation :

$$F = k \,.\, \delta \qquad (2)$$

avec k une constante dépendant du ressort qui doit être choisie de façon à permettre un déplacement δ du boîtier d'au moins 20 mm en fin d'essai et de façon à ce que l'accélération du boîtier soit négligeable tout au long de l'essai.

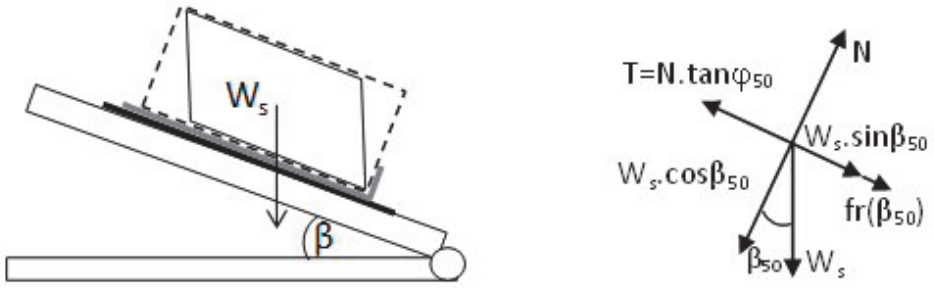

Figure 1. Forces considérées pour le calcul de l'angle de frottement φ_{50} à l'interface dans le cas de la procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2

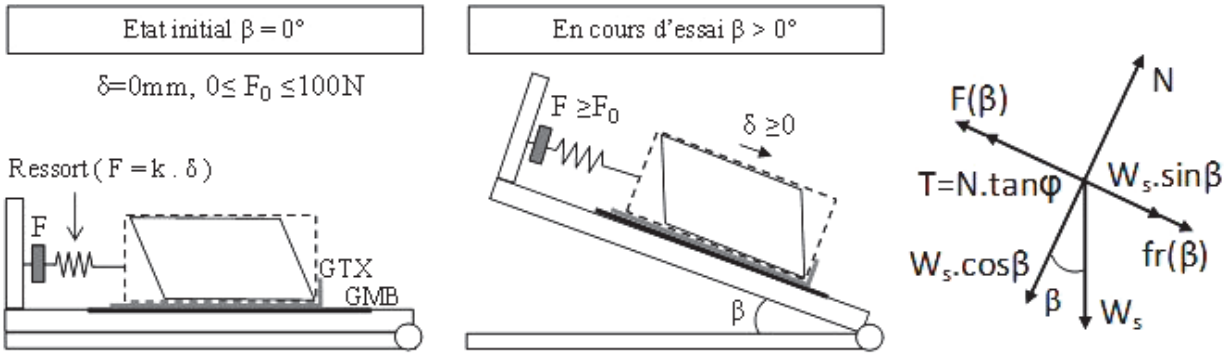

Figure 2. Étapes de la procédure « d'essai en frottement résiduel » et bilan des forces correspondant au calcul de l'angle φ

Initialement, le ressort utilisé pour retenir le boîtier supérieur est légèrement prétendu avec une force inférieure ou égale à 100 N. Cette pré-tension initiale évite un mouvement d'accélération du boîtier supérieur au départ du glissement. Ensuite, l'inclinaison du plan augmente. Pour une inclinaison du plan β_0, dont la valeur dépendra de l'interface testée, le boîtier supérieur glisse sur le plan incliné (δ ≥ 0mm). L'essai se poursuit avec l'inclinaison du plan qui continue d'augmenter. La déformation élastique du ressort induit un mouvement de glissement uniforme du boîtier supérieur et la mesure de la force F permet de déterminer la force de frottement à l'interface grâce à la relation (3), déduite du bilan des forces de la figure 2 :

$$T = W_s \cdot \sin\beta + fr(\beta) - F(\beta) \quad (3)$$

avec F(β) la force nécessaire pour retenir le boîtier.

L'angle de frottement de l'interface testée peut-être déterminé par l'intermédiaire de la courbe (β, T/N). Si la courbe (β, T/N) présente un pic, correspondant au frottement maximal mobilisable par l'interface, et un palier, correspondant au frottement résiduel de l'interface, il est possible de déterminer deux angles de frottement φ_{pic} et φ_{res} en utilisant respectivement les équations (4) et (5). Si la courbe (β, T/N) ne présente pas de pic, seul l'angle de frottement φ_{res} peut être déterminé.

$$\tan\varphi_{pic} = \left(\frac{T}{N}\right)_{pic} = \frac{T_{pic}}{W_s \cdot \cos\beta_{pic}} \quad (4)$$

$$\tan\varphi_{res} = \left(\frac{T}{N}\right)_{res} \quad (5)$$

Le paramètre (T/N) est choisi pour représenter l'évolution des forces de frottement en cours d'essai car, quand le frottement résiduel est atteint, ce paramètre reste constant à la différence du paramètre T qui varie du fait de la variation de l'effort normal N avec l'inclinaison du plan.

Il est à noter que l'équation (3) est valable si : (i) le boîtier supérieur est en condition statique (condition atteinte avant le départ du glissement) ; (ii) le boîtier supérieur a un mouvement de glissement uniforme (condition atteinte une fois que le boîtier supérieur a glissé), (iii) le boîtier supérieur a une accélération négligeable (condition qui doit être vérifiée au départ du glissement). En effet, le bilan des forces appliquées au boîtier qui subirait une accélération γ s'écrit :

$$W_s \cdot \sin\beta + fr(\beta) - T - F(\beta) = W_s \cdot \gamma / g \quad (6)$$

Ainsi, l'équation (6) se simplifie en équation (3) si :

$$\sin\beta >> \gamma/g \quad (7)$$

L'équation (7) est ainsi à vérifier tout au long de l'essai pour déterminer la force de frottement T par l'équation (3). Si ces conditions ne sont pas vérifiées, le ressort doit être adapté pour obtenir la constante de raideur k adéquate. Dans cette étude, k était égal à 25.10^3 $N.m^{-1}$.

2.3. Appareillage

Le plan incliné est composé d'un support inclinable sur lequel repose un boîtier supérieur mobile à l'aide de roulettes guidées par des rails. Les dimensions (longueur et largeur) du boîtier sont de 1 m. Un treuil motorisé et piloté informatiquement permet d'appliquer une vitesse d'inclinaison constante.

2.4. Programme expérimental

Une interface géomembrane-géotextile a été testée dans cette étude. Elle était composée d'une géomembrane structurée (avec picots) fixée au plan incliné sur lequel un géotextile tissé était fixé sur le boitier supérieur. Trois essais ont été réalisés sur des interfaces vierges selon la procédure de la norme NF EN ISO 12957-2. La seule différence fut la vitesse d'inclinaison qui était de 2°/min, au lieu de 3°/min et la contrainte de confinement normale initiale de 4 kPa, au lieu de 5 kPa.

Selon la procédure de frottement résiduel (Stoltz et al., 2012), trois essais sur des interfaces vierges ont été réalisés. Les trois interfaces sont notées A, B et C (tableau 1) et le premier essai sur ces interfaces vierges est noté A-1, B-1 et C-1. Pour tester une interface non vierge, c'est-à-dire une interface qui a déjà connu un glissement, deux essais additionnels ont été menés sur les interfaces A et B, respectivement notées A-2, A-3 et B-2, B-3. Pour ces essais, la contrainte normale initiale de 4 kPa a été maintenue entre les essais. En d'autres termes, l'interface vierge a subi le premier essai A-1 ; le plan incliné a été remis dans sa position initiale pour réaliser le second essai A-2 ; enfin la même procédure est appliquée pour réaliser l'essai A-3. La même démarche a été appliquée sur l'interface B. Enfin, pour évaluer « l'histoire » de glissements subis par une interface, l'interface B, qui a été testée trois fois de suite, a été déchargée (σ = 0 kPa) après l'essai B-3 et ensuite reconfinée (σ = 4 kPa) pour subir une nouvelle série de trois essais notés B'-4, B'-5 et B'-6. La notation « B prime » correspond à un déconfinement de l'interface.

3. Résultats et discussion

3.1. Essais menés selon la procédure de la norme NF EN ISO 12957-2

Les courbes du déplacement de l'interface en fonction de l'inclinaison du plan (figure 3) indiquent un comportement de l'interface en glissement de type « glissement rapide ». Les inclinaisons du plan comprises entre 18 et 20 degrés permettent de calculer, à partir de l'équation (1), un angle de frottement φ_{50} compris entre 25 et 27degrés, d'où un angle de frottement moyen de 26 degrés mesuré suivant la procédure de la norme NF EN ISO 12957-2.

Tableau 1. Notations des essais réalisés selon la procédure de frottement résiduel sur l'interface testée géotextile tissé / géomembrane structurée

Interface géosynthétique	géotextile tissé / géomembrane structurée (à picots)		
Échantillon testé	A	B	C
Notation	A – 1 A – 2 A – 3	B – 1 B – 2 B – 3	C – 1
	/	B' – 4 B' – 5 B' – 6	/

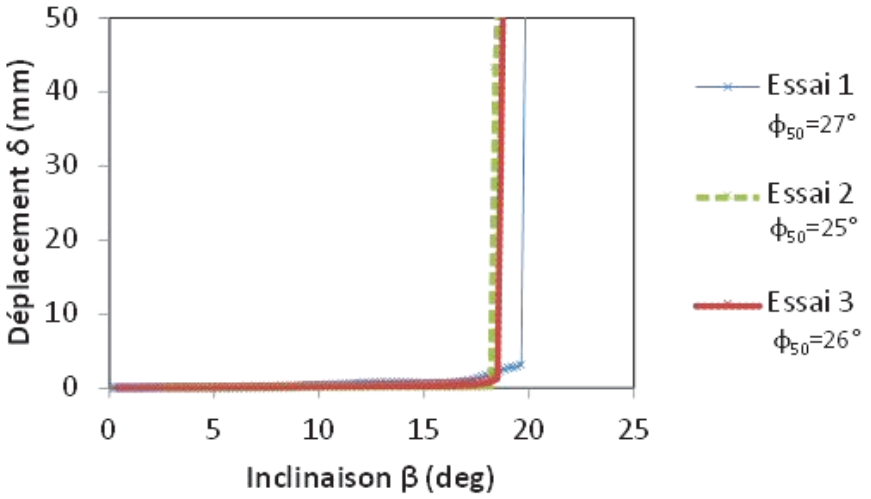

Figure 3. Résultats obtenus à partir de la procédure de la norme NF EN ISO 12957-2

3.2. Essais menés selon la procédure d'essai de frottement résiduel

3.2.1. Interfaces vierges A, B et C

Pour chaque essai, le déplacement δ, la force F retenant le boîtier supérieur et le paramètre T/N sont donnés sur la figure 4, en fonction de l'inclinaison β du plan. Les résultats montrent que, pour une inclinaison β du plan comprise entre 24 et 26 degrés, δ et F augmentent significativement. Ces valeurs d'inclinaison du plan correspondent à un pic pour l'angle de frottement, calculé à partir de l'équation (4), environ égal à 28 degrés pour les essais A-1 et C-1 et 30 degrés pour l'essai B-1. Après la forte augmentation de δ et F, ces derniers augmentent linéairement avec β correspondant à un mouvement de glissement uniforme du boîtier supérieur. En termes de frottement, ce mouvement se traduit d'abord par une diminution du paramètre T/N suivi d'un palier. Ce palier $(T/N)_{res}$, identique pour les trois interfaces testées, permet de calculer, à partir de l'équation (5), un angle de frottement résiduel φ_{res} environ égal à 21 degrés.

Pour calculer le paramètre T/N tout au long de l'essai à partir de l'équation (3), l'équation (7) doit être vérifiée tout au long de l'essai et particulièrement au départ du glissement qui induit la plus forte accélération. Pour les trois essais, l'accélération maximale a été obtenue pour l'essai B-1 pour une inclinaison de 26,5 degrés, soit un sin β égal à 0,446. Elle peut être estimée à 1.10^{-4} $m.s^{-2}$ ce qui confirme la vérification de l'équation (7) pour l'ensemble des trois essais.

En conclusion, la procédure d'essai de frottement résiduel permet d'obtenir un angle de frottement d'une interface impliquant des géosynthétiques pour une condition de mouvement de glissement uniforme.

3.2.2. Essais successifs A-2, A-3 et B-2, B-3

Les essais A-1 et B-1 réalisés sur des interfaces vierges sont comparés figure 5 aux essais A-2, A-3 et B-2 et B-3 respectivement, correspondant aux interfaces qui ont déjà glissées sans être déconfinées (σ=0 kPa) entre chaque glissement. Les résultats montrent que l'angle de frottement au pic se situe aux alentours de 23 degrés pour les quatre essais A-2, A-3, B-2 et B-3 alors qu'il était supérieur à 28 degrés pour les essais A-1 et B-1 correspondant aux interfaces vierges. L'angle de frottement au pic φ_{pic} est donc significativement réduit une fois que les interfaces ont connu un premier glissement. Pour les essais A-2, A-3, B-2 et B-3, l'angle de résiduel φ_{res} peut être évalué à environ 21 degrés; correspondant à la valeur obtenue sur les interfaces vierges A-1 et B-1. D'où, dans le cas de l'interface testée, la diminution de φ_{pic} n'altère pas la valeur de φ_{res}.

3.2.3. Essai sur interfaces non vierges B'-4, B'-5 et B'-6

Les résultats des essais B'-4, B'-5 et B'-6 sont comparés figure 5 à ceux des essais B-1, B-2 et B-3, réalisés sur la même interface B mais qui n'a pas subi de déconfinement. A partir des essais B-1 et B'-1, les mêmes valeurs d'angle de frottement de pic sont obtenus bien que l'interface B' a déjà glissée suite aux essais successifs B-1, B-2 et B-3. De plus, l'essai B'-1 présente la même valeur d'angle de frottement résiduel que l'essai B-1. Il peut ainsi être conclut que l'interface B n'a pas été endommagée par les essais successifs B-1, B-2 et B-3. Ainsi, la diminution de l'angle de frottement de pic φ_{pic} à l'angle de frottement résiduel φ_{res} ne correspond pas à un endommagement de l'interface et le comportement pic-palier de la courbe (β, T/N) est caractéristique de comportement en glissement de l'interface testée au plan incliné. Une valeur maximale de l'angle de flottement au pic est obtenue quand l'interface n'a jamais glissée. Ainsi, dans le cas de l'interface testée qui n'est pas endommagée par le glissement durant l'essai, l'angle de frottement de pic φ_{pic} dépend de « l'histoire du glissement » à la différence de l'angle de frottement résiduel φ_{res}.

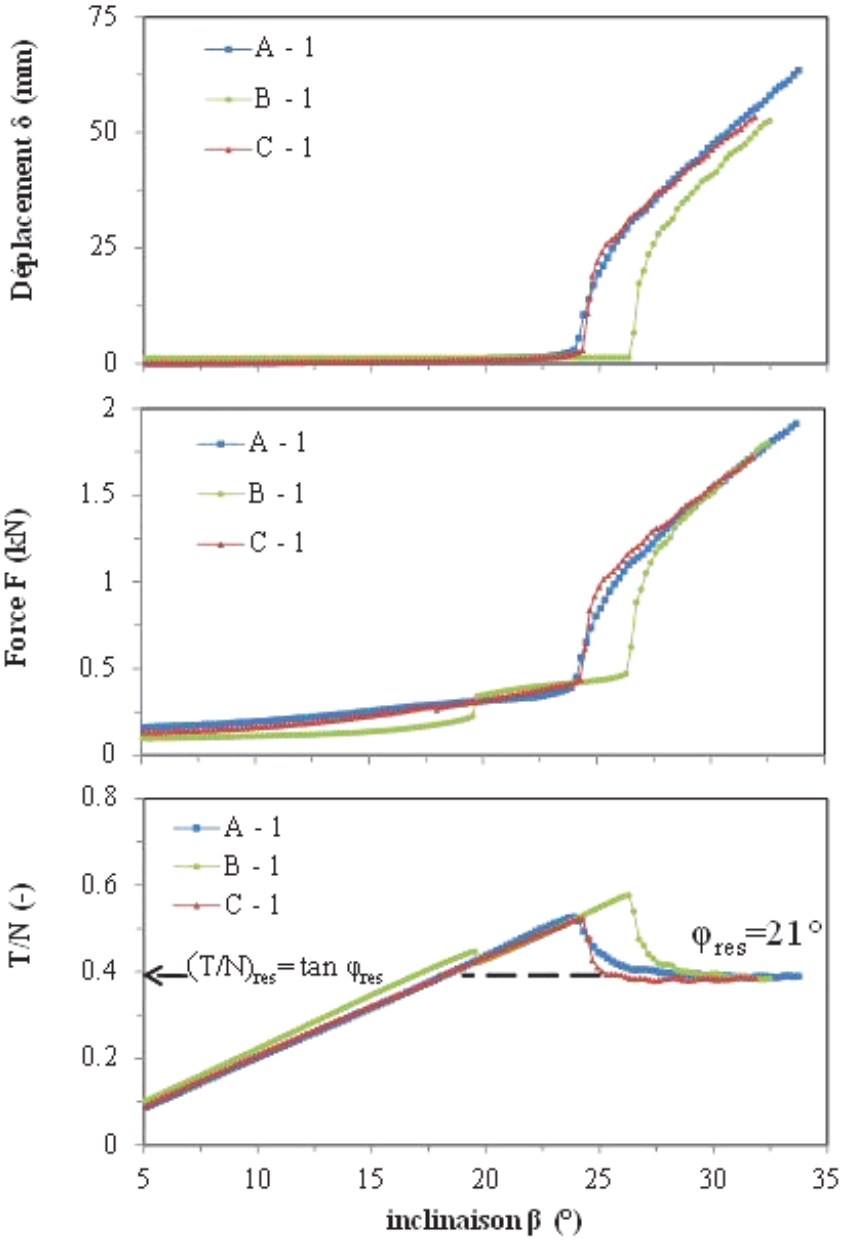

Figure 4. Déplacement δ, force F, et paramètre T/N obtenus à partir de la procédure d'essai de frottement résiduel sur les interfaces vierges A, B et C

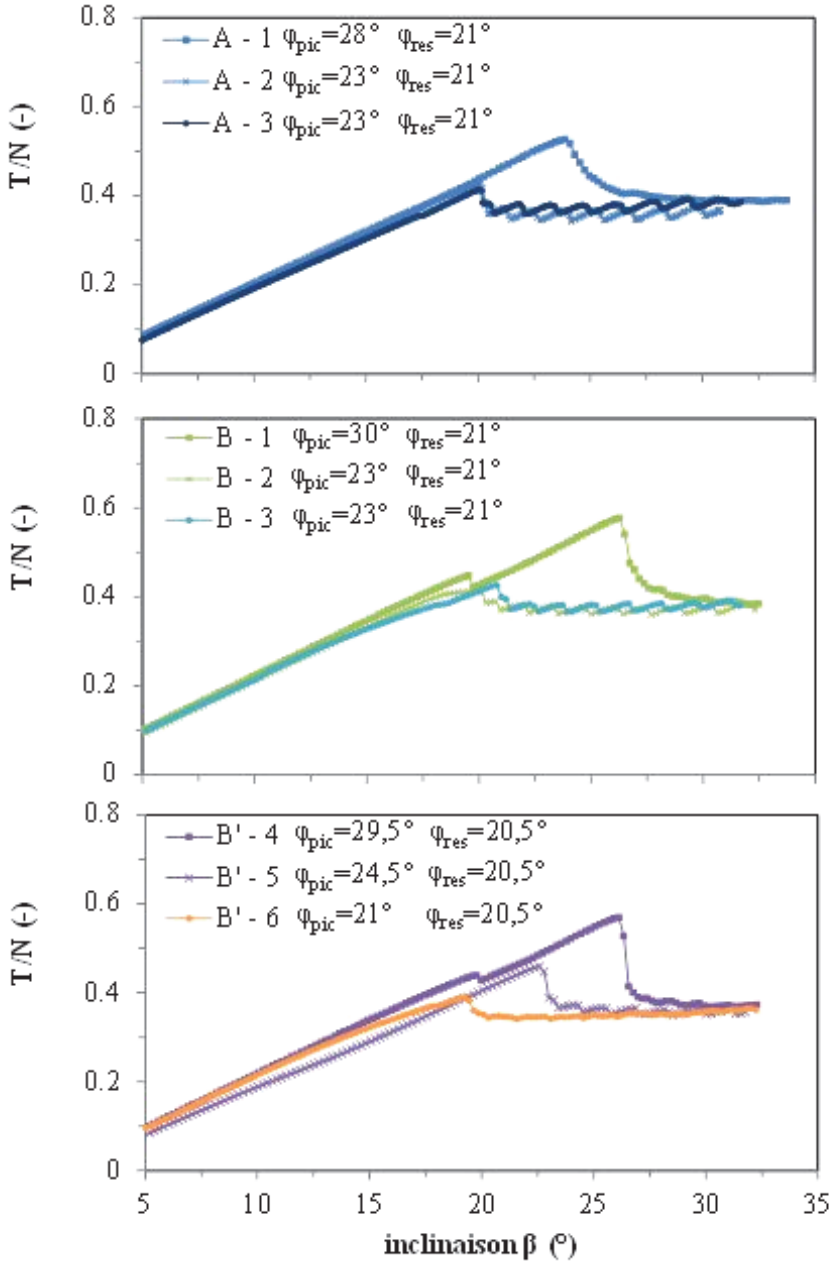

Figure 5. Courbes (β, T/N) et angles de frottement calculés des interfaces A, B et C obtenus à partir de la procédure d'essai de frottement résiduel

3.3. Comparaison entre la procédure selon la norme NF EN ISO 12957-2 et la procédure d'essai de frottement résiduel

La procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2 a permis d'évaluer un angle de frottement φ_{50} de 26 degrés. La procédure d'essai de frottement résiduel a permis d'évaluer deux angles de frottement : un angle de frottement de pic φ_{pic} d'environ 29 degrés et un angle de frottement résiduel φ_{res} de 21 degrés φ_{50} est proche de φ_{pic}. En effet, la procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2 évalue l'angle de frottement à partir de l'inclinaison du plan β_{50} correspondant à un déplacement de 50 mm de l'interface. Cette inclinaison β_{50} est injectée dans l'équation (1) pour le calcul de l'angle de frottement φ_{50}. Or, cette équation (1) est issue d'un bilan des forces où la force de frottement T est déduite et non mesurée. Or, il est montré par l'essai de frottement résiduel qu'à partir du moment où l'interface glisse, la force de frottement T à l'interface diminue, d'où l'obtention d'un comportement en glissement de type pic-palier de la courbe (β, T/N). En conclusion, la procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2 ne peut déterminer qu'un angle de frottement proche de l'angle au pic mais ne permet pas de déterminer l'angle de frottement « post-pic » correspondant à l'angle de frottement résiduel. Or, dans le cas où les nappes géosynthétiques sont placées sur des pentes, les petits

déplacements qui se produisant lors de la mise en œuvre peuvent amener les interfaces comportant des géosynthétiques dans des conditions de type « palier » vis-à-vis de la résistance au glissement. Dans ces conditions, la procédure d'essai de frottement résiduel est particulièrement adaptée pour déterminer l'angle de frottement résiduel afin d'assurer la stabilité au glissement du système géosynthétique sur pente.

Enfin, si l'on se réfère à la norme XP G 38-067 (AFNOR, 2010) qui vise à assurer la « stabilité sur pente de couches minces de protection de dispositifs géosynthétiques », un paramètre clé de dimensionnement est l'angle de frottement au niveau de chaque interface impliquant des géosynthétiques. Selon cette norme, les calculs de stabilité requièrent les résistances au glissement de palier des interfaces, qu'elles présentent ou non des résistances de pic. Cette étude montre que, pour une interface géosynthétique qui a un comportement de type pic-palier vis-à-vis de la résistance au glissement, la norme NF EN ISO 12957-2 ne permet pas la détermination de l'angle de frottement utile pour la norme XP G 38-067 à la différence de la procédure d'essai de frottement résiduel.

4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif de comparer la procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2 à la procédure d'essai de frottement résiduel proposée par Stoltz et al. (2012). Une interface géomembrane-géotextile a été testée dans cet objectif. Les résultats obtenus ont montré que la norme NF EN ISO 12957-2 ne permettait pas de déterminer un angle de frottement correspondant à une résistance de palier, à la différence de la procédure d'essai de frottement résiduel. En conclusion, la procédure de Stoltz et al. (2012) permet de déterminer un angle de frottement résiduel, paramètre indispensable pour le dimensionnement des systèmes géosynthétiques sur pente comme le requiert la norme XP G 38-067 (AFNOR, 2010).

5. Références

AFNOR (2010). XP G 38-067 Géosynthétiques – Géotextiles et produits apparenté, Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente. BNSR, GSY.

AFNOR (2005) NF EN ISO 12957-2 (2005). Géosynthétiques – Détermination des caractéristiques de frottement, Partie 2 : Essais sur plan incliné. Comité européen de normalisation, Bruxelles.

Briançon L., Girard H., Gourc J-P., Poulain D. (2011). Justification d'une modification de la norme relative au frottement des interfaces géosynthétiques au plan incliné. Rencontres Géosynthétiques 2011, Tours, France, 219-228.

Izgin M., Wasti Y. (1998). Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests. Geotextiles and Geomembranes 16 (3), 207-219.

Palmeira E.M., Lima Jr. N.R., Mello L.G.R. (2002). Interaction between soils and geosynthetic layers in large-scale ramp tests. Geosynthetics International 9 (2), 149-187.

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.

Reyes-Ramirez R., Gourc J-P. (2003). Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship. Geosynthetic International 10 (5), 165-175.

Stoltz G., Gallo R., Poulain D., Touze-Foltz N. (2012). Improvement of the inclined plane device to assess the friction properties at geosynthetics interfaces. Eurogeo 5 Valence (Espagne), 5 pages.