



Procédure d'essai au plan incliné pour déterminer les propriétés de frottement résiduel aux interfaces géosynthétiques

Guillaume Stoltz, D. Poulain, E. Loheas, R. Gallo, Nathalie Touze

► To cite this version:

Guillaume Stoltz, D. Poulain, E. Loheas, R. Gallo, Nathalie Touze. Procédure d'essai au plan incliné pour déterminer les propriétés de frottement résiduel aux interfaces géosynthétiques. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Jul 2012, Bordeaux, France. 8 p. hal-00763344

HAL Id: hal-00763344

<https://hal.science/hal-00763344>

Submitted on 10 Dec 2012

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.

PROCEDURE D'ESSAI AU PLAN INCLINE POUR DETERMINER LES PROPRIETES DE FROTTEMENT RESIDUEL AUX INTERFACES GEOSYNTHETIQUES

TESTING METHOD USING AN INCLINED PLANE DEVICE TO ASSESS THE RESIDUAL FRICTION PROPERTIES AT GEOSYNTHETICS INTERFACES

Guillaume STOLTZ¹, Daniel POULAIN², Elodie LOHEAS¹, Roland GALLO¹, Nathalie TOUZE-FOLTZ¹

1 IRSTEA, UR HBAN, Centre d'Antony, F-92160, Antony.

2 IRSTEA, UR REBX, Centre de Bordeaux, F-33612, Cestas.

RÉSUMÉ — Cette étude présente une méthode de détermination des propriétés de frottement résiduel aux interfaces géosynthétiques par un dispositif de type plan incliné. La procédure proposée est comparée à la procédure de la norme en vigueur et à une autre issue de la bibliographie. Les essais menés sur une interface géomembrane-géotextile montrent que la procédure proposée est mieux adaptée pour déterminer un angle de frottement à l'interface conservatif et représentatif des conditions de terrain.

ABSTRACT — This study presents a testing method to determine the residual friction properties at geosynthetic interfaces using an inclined plane device. The proposed testing method is compared to the standardized procedure and to another procedure from the literature. The tests performed on a geomembrane-geotextile interface show that the proposed testing method is better suitable to assess a conservative interface friction angle that is representative of in-situ conditions.

1. Introduction

Le dimensionnement de complexes géosynthétiques sur pente nécessite les propriétés de frottement aux interfaces sol-géosynthétique et/ou géosynthétique-géosynthétique. Ces propriétés sont d'autant plus fondamentales dans le contexte d'optimisation de l'encombrement des structures qui conduit souvent à un raidissement des talus (par ex. les casiers d'installations de stockage de déchets non dangereux). 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 ». A 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.

L'objectif de cette étude est de proposer une procédure d'essai au plan incliné qui détermine l'angle de frottement résiduel aux interfaces géosynthétiques en condition de glissement quasi-statique (non dynamique). Cette procédure appelée « essai de frottement résiduel » est comparée à la procédure selon la norme NF EN ISO 12957-2 et à la « procédure en force » selon Briançon *et al.* (2011) à partir des résultats obtenus par des essais sur une interface géotextile tissé - géomembrane structurée.

2. Procédures d'essais 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 u de 50 mm. La vitesse d'inclinaison du plan requise est de $3,0 \pm 0,5$ degrés par minute ; la contrainte normale initiale ($\beta=0^\circ$) confinant l'interface doit être de $5,0 \pm 0,1$ 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 selon le bilan des forces de la Figure 1 :

$$\tan \varphi_{50} = \frac{W_s \cdot \sin \beta_{50} + fr(\beta_{50})}{W_s \cdot \cos \beta_{50}} \quad (1)$$

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.

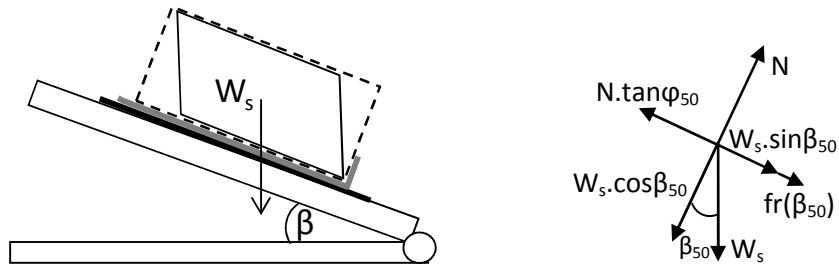


Figure 1 . Forces considérées pour le calcul de l'angle de frottement ϕ_{50} à l'interface dans le cas de la procédure d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2

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 montré 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 en force » selon Briançon et al. (2011)

Le principe de la procédure « d'essai en force » selon Briançon et al. (2011) consiste à mesurer la force F qui retient le boîtier supérieur lorsqu'il a glissé d'un déplacement u_{lim} suite à l'augmentation de l'inclinaison β du plan à vitesse constante. Elle comporte trois étapes (Figure 2). Au départ de l'essai (étape 1), le câble servant à retenir le boîtier supérieur n'est pas tendu ; le boîtier est donc libre de se déplacer « sans retenue ». L'étape 2 est une étape transitoire définie par l'inclinaison β comprise entre β_0 , correspondant au tout début du glissement, et β_{lim} , correspondant à l'inclinaison pour laquelle le paramètre $\tan \lambda$ (Equation 2) devient constant. Durant cette étape, la force F retenant le boîtier, qui a glissé du déplacement maximal autorisé u_{lim} , est mesurée. Au cours de l'étape 3, le paramètre $\tan \lambda$ est sensé être constant quelque soit l'inclinaison β (supérieure à β_{lim}). Sur le schéma, il est indiqué que le déplacement u peut devenir supérieur à u_{lim} si le câble retenant le boîtier se déforme un peu lorsqu'il est mis en tension.

Durant la phase transitoire, le boîtier accélère puis est stoppé par le câble le retenant. L'accélération du boîtier n'étant pas mesurée, il n'est pas possible d'écrire un bilan des forces permettant de déterminer l'angle de frottement de l'interface. Tout au long de l'essai, le paramètre $\tan \lambda$ correspondant au bilan des forces de la Figure 2 (qui ne comprend pas la force issue de l'accélération du boîtier) peut être calculé :

$$\tan \lambda = \frac{W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) - F(\beta)}{W_s \cdot \cos \beta} \quad (2)$$

Avec $F(\beta)$ la force nécessaire pour retenir le boîtier ; $F(\beta)=0$ N à l'étape 1.

Briançon et al. (2011) considèrent que l'angle de frottement de l'interface est égal à λ lorsque $\tan \lambda$ devient constant, c'est-à-dire à l'étape 3.

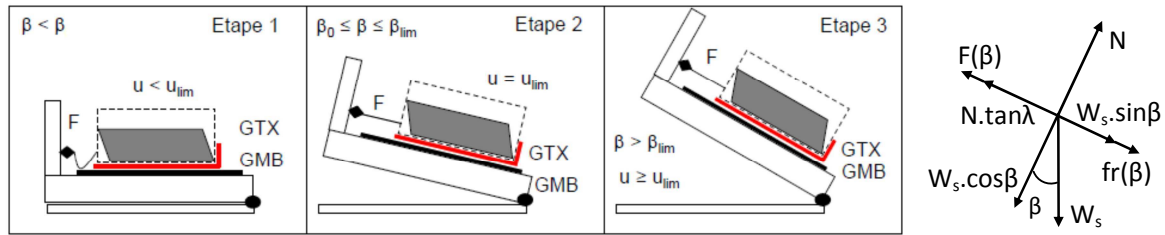


Figure 2 . Etapes de la procédure « d'essai en force » (issues de Briançon *et al.*, 2011) et bilan des forces correspondant au calcul de l'angle λ

Il est à noter que la valeur de u_{lim} est laissée au choix de l'opérateur. Briançon *et al.* (2011) discutent de ce choix en suggérant de choisir « une petite valeur » et en soulignant que la valeur doit être « suffisante pour que le frottement soit entièrement mobilisé avant l'étape 3 ». Ils préconisent de prendre u_{lim} égal à 20 mm.

2.3. Procédure « d'essai de frottement résiduel »

Sur le même principe de mesurer la force F nécessaire pour retenir le boîtier supérieur, cette procédure consiste à mesurer le frottement d'une interface géosynthétique lorsqu'elle est en condition de glissement quasi-statique quelle que soit l'inclinaison β du plan qui augmente à vitesse constante. La condition de glissement quasi-statique est permise grâce à un ressort qui relie la force F au déplacement u du boîtier par la relation :

$$F = k \cdot u \quad (3)$$

avec k une constante dépendant du ressort qui doit être choisie de façon à permettre un déplacement u 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 (Equation 7).

L'analyse de l'essai peut se faire selon 3 étapes (Figure 3). Initialement (étape 1), le ressort servant à retenir le boîtier est légèrement pré-tendu à une force F inférieure ou égale à 100 N. Le début de l'étape 2 est caractérisé par l'inclinaison β_0 correspondant au tout début du glissement du boîtier (déplacement $u \geq 0$ mm). Au cours de cette étape, l'angle φ (Equation 4) augmente avec β jusqu'à atteindre une valeur maximale φ_{pic} , obtenue à l'inclinaison β_{pic} . Lorsque l'inclinaison β_{pic} est dépassée au début de l'étape 3, le boîtier continue de se déplacer. L'essai doit se poursuivre jusqu'à obtenir une valeur φ résiduelle notée φ_{res} .

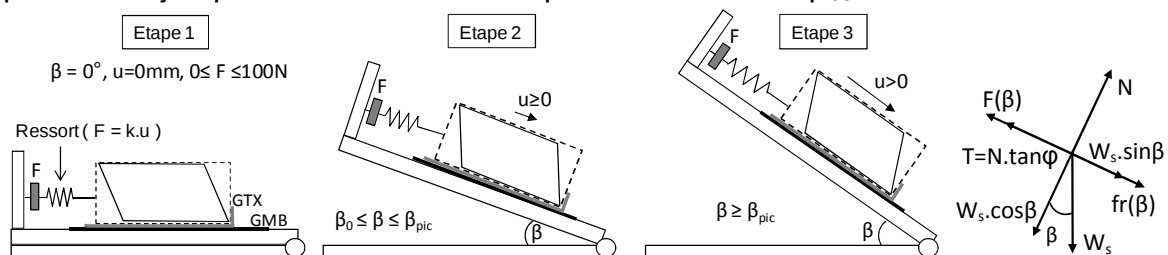


Figure 3 . Etapes de la procédure « d'essai en frottement résiduel » et bilan des forces correspondant au calcul de l'angle φ

Le bilan des forces au cours de l'essai (Figure 3) permet de calculer la tangente de l'angle φ (rapport entre les forces de frottement T et l'effort normal N) :

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

L'essai permet de déterminer l'angle de frottement résiduel φ_{res} de l'interface étudiée en repérant le palier de la courbe (β , φ).

Il est à noter que l'équation (4) est valable si l'accélération du boîtier est négligeable durant tout l'essai. En effet, le bilan des forces appliquées au boîtier qui subirait une accélération γ s'écrit :

$$W_s \cdot \sin \beta + fr(\beta) - W_s \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi - F(\beta) = W_s \cdot \gamma / g \quad (5)$$

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

soit

Il en résulte que l'équation (4) est valable si :

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

Les conditions de déplacement quasi-statiques du boîtier, permises grâce ressort, sont à vérifier en fin d'essai.

3. Matériel et Méthode

3.1. Description du plan incliné utilisé

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. Quelle que soit la procédure d'essai (2.1, 2.2, 2.3), la vitesse de 2° par minute a été appliquée. Le boîtier supérieur a été rempli avec du sable pour appliquer une contrainte normale initiale de 4 kPa sur l'interface testée. Pour la procédure « d'essai en force » selon Briançon *et al.* (2011), ces derniers ne donnent pas d'indication sur la nature du câble à utiliser pour retenir le boîtier. Dans cette étude, une élingue a été choisie. Pour la procédure « d'essai de frottement résiduel », le ressort a été choisi de façon à avoir une constante k , définie par l'équation 3, égale à $25 \cdot 10^3 \text{ N.m}^{-1}$.

3.2. Programme expérimental

L'interface géosynthétiques testée dans cette étude est composée d'une géomembrane (GMB) structurée (à picots), fixée sur le support du plan incliné, et d'un géotextile (GTX) tissé, fixé sur le boîtier supérieur. 9 essais ont été réalisés sur des interfaces vierges :

- Trois essais selon la procédure de la norme NF EN ISO 12957-2 ;
- Trois essais selon la procédure « d'essai en force » de Briançon *et al.* (2011) avec des valeurs de u_{lim} variables : 20mm, 40mm et 160mm ;
- Trois essais selon la procédure « d'essai de frottement résiduel »

4. Résultats et discussion

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

Les résultats obtenus donnent un angle de frottement de l'interface ϕ_{50} étudiée compris entre 25° et 27° avec une moyenne de 26°.

4.2. Procédure « d'essai en force » selon Briançon et al. (2011)

Pour chaque essai, le déplacement du boîtier u , la force F retenant le boîtier et l'angle λ (Equation 2) sont donnés Figure 4 en fonction de l'inclinaison β du plan. Après glissement du boîtier supérieur, obtenu pour des inclinaisons comprises entre 16° et 17°, la valeur de l'angle λ diminue significativement puis augmente à nouveau sans atteindre une stabilisation clairement identifiée pour les trois essais. Seul l'essai n°2 permet d'identifier un début de palier, pour le quel l'angle λ vaut 19°.

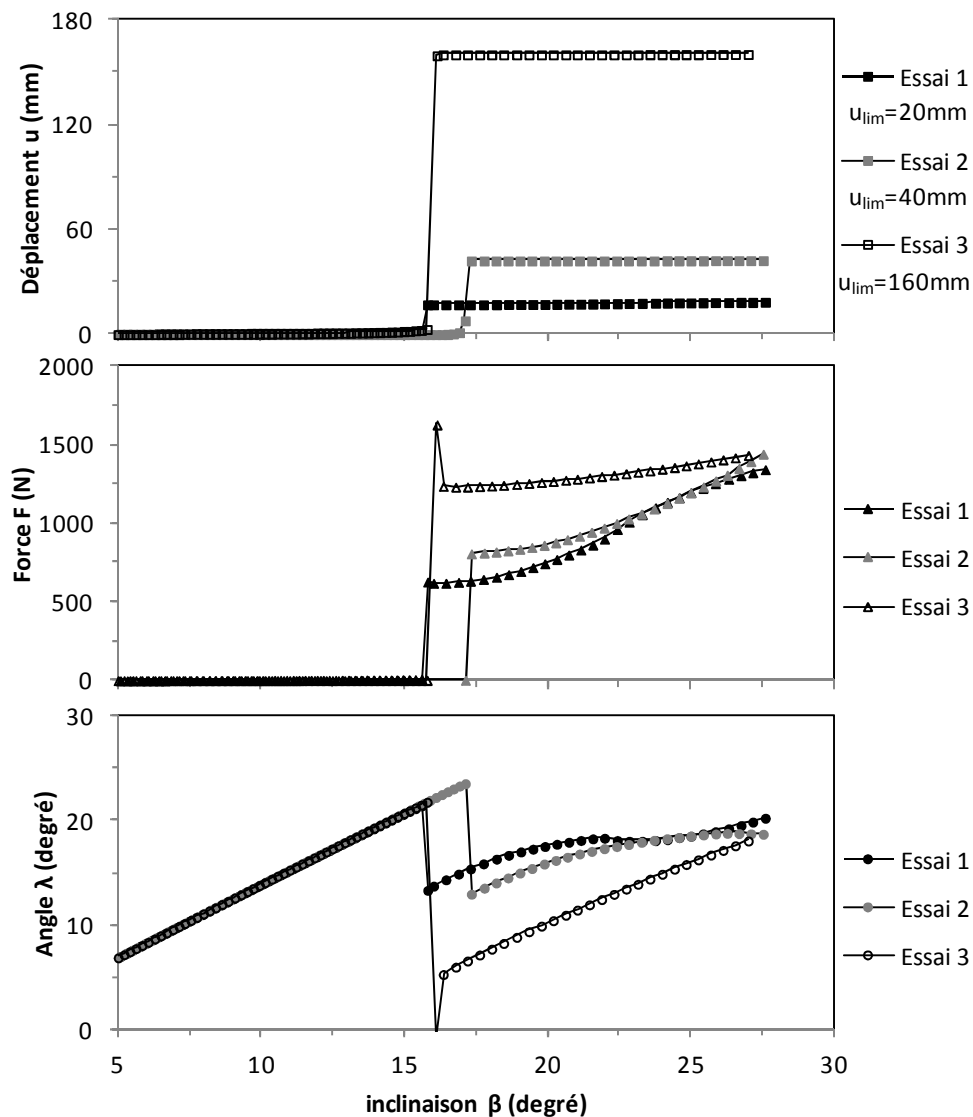


Figure 4 . Résultats de frottement à l'interface étudiée obtenus par la procédure « d'essai en force » selon Briançon et al. (2011)

La procédure « d'essai en force » selon Briançon *et al.* (2011) ne semble donc pas adaptée pour déterminer l'angle de frottement de l'interface étudiée. Une analyse de la cinématique de l'essai peut permettre de l'expliquer. En effet, l'élingue servant à retenir le boîtier est initialement non tendue pour permettre un glissement du boîtier. Dès que le boîtier supérieur rentre en mouvement, il subit une accélération qui se traduit par une force dynamique. Au moment où l'élingue retient le boîtier, une partie de la force dynamique est reprise dans la tension de l'élingue qui induit par conséquence un soulagement des frottements au niveau de l'interface et donc une diminution brusque de l'angle λ comme observé Figure 4. L'essai n°3 semble confirmer cette hypothèse. En effet, il permet un déplacement maximal du boîtier u_{lim} élevé ($u_{lim}=160\text{mm}$) ce qui engendre vraisemblablement une accélération plus élevée que les deux autres essais. La force de mise en tension de l'élingue voit un pic ($F > 1600\text{ N}$) qui conduit, par le calcul, à un angle λ négatif.

4.3. Procédure « d'essai de frottement résiduel »

Les résultats de la Figure 5 montrent que pour une inclinaison β comprise entre 24° et 26° , le déplacement u du boîtier supérieur et la force F augmentent significativement. Ces inclinaisons (β_{pic}) correspondent à un pic pour l'angle de frottement à l'interface (φ_{pic}), environ égal à 28° pour les essais 1 et 3 et 30° pour l'essai 2. Après β_{pic} , u et F augmentent de façon linéaire avec β , correspondant à un palier pour l'angle de frottement à l'interface (φ_{res}). L'angle de frottement résiduel φ_{res} de l'interface étudiée est évalué à 21° pour les 3 essais. Il est à noter que, à la différence des procédures d'essai selon la norme NF EN ISO 12957-2 et « d'essai en force » selon Briançon *et al.* (2011), cet angle de frottement est mesuré pour des conditions de glissement de l'interface quasi-statiques. Ces conditions quasi-statiques sont néanmoins à vérifier selon l'équation (7). L'accélération γ la plus forte est obtenue pour l'essai 2 à l'inclinaison $26,5^\circ$ avec une valeur estimée à environ 1.10^{-4}m.s^{-2} . On vérifie donc bien l'équation (7). La procédure « d'essai de frottement résiduel » permet de déterminer un angle de frottement résiduel conservatif par rapport à l'angle obtenu par la procédure selon la norme NF EN ISO 12957-2.

5. Conclusion

Cette étude avait pour objectif la détermination des propriétés de frottement résiduel aux interfaces géosynthétiques par un dispositif de type plan incliné. Une procédure appelée « essai de frottement résiduel » est proposée pour mesurer un angle de frottement d'interface en condition de glissement quasi-statique, représentatif des conditions de terrain où des interfaces géosynthétiques peuvent subir de légers mouvements lors de leur mise en place.

Une interface géomembrane-géotextile a été testée selon trois procédures : celle selon la norme NF EN ISO 12957-2, la procédure « d'essai en force » selon Briançon *et al.* (2011) et la procédure « d'essai de frottement résiduel ».

Les résultats montrent que la procédure « d'essai de frottement résiduel » mesure un angle de frottement conservatif par rapport à celle selon la norme NF EN ISO 12957-2.

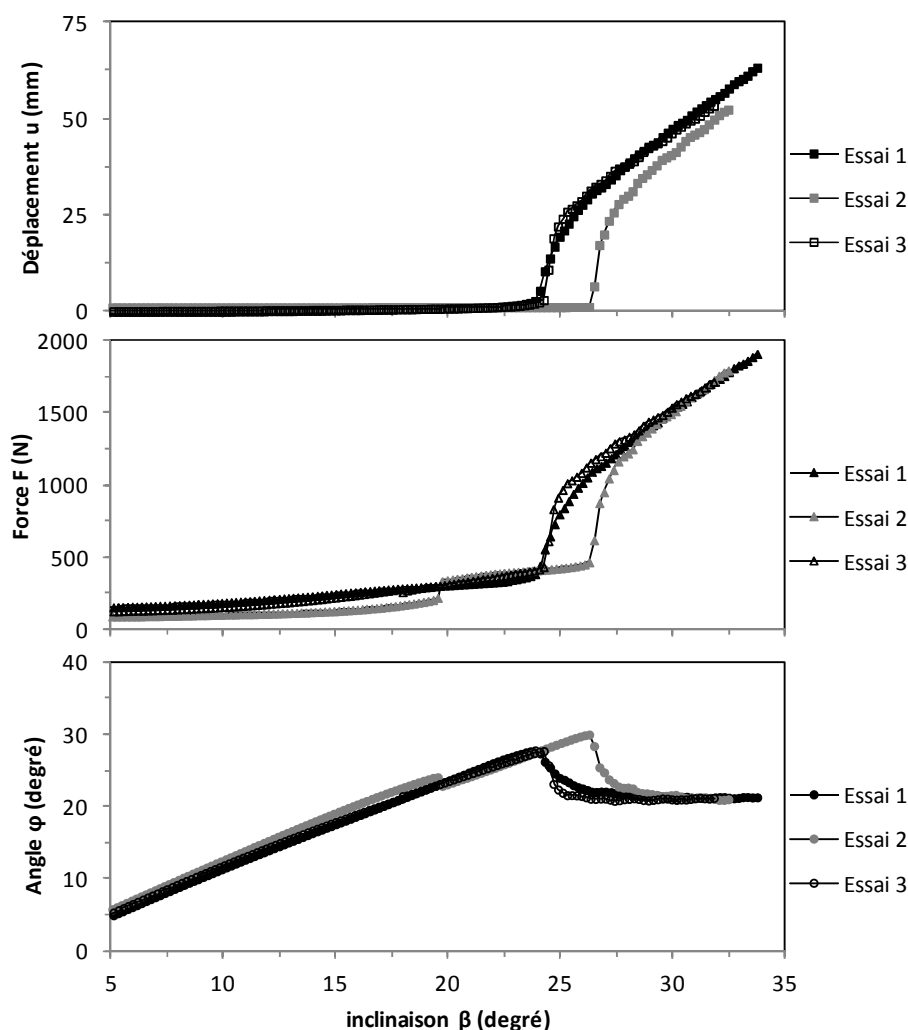


Figure 5 . Résultats de frottement à l'interface étudiée obtenus par la procédure « d'essai en frottement résiduel »

Références bibliographiques

- 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.