

# ETUDE EXPERIMENTALE ET THEORIQUE DE LA POUSSEE PASSIVE SUR PIEU RIGIDE

Par

**M. MEKSAOUINE**

Docteur d'Etat, Chargé de cours, C.U. Guelma

**Y. CHERAIT**

Docteur d'Etat, Chargé de cours, C.U. Guelma

## Résumé

*Cette étude présente des résultats théoriques et expérimentaux du phénomène de la butée devant des écrans de largeur limitée. On discute des résultats obtenus sur un modèle réduit utilisant comme matériau le sable sec.*

*Deux modèles théoriques sont développés et leurs résultats confrontés à ceux expérimentaux.*

**Mots clés :** butée • écran • pieu • élanement.

## 1 INTRODUCTION

Divers ouvrages (soutènements discontinus, pieux sollicités horizontalement, etc...) sollicitent le sol suivant un mécanisme de butée tridimensionnelle. Les insuffisances des méthodes de calcul existantes [2] et des travaux de certains auteurs [3][4], nous ont conduit à effectuer une campagne expérimentale sur modèle réduit et à élaborer plusieurs modèles théoriques suivant la théorie de la borne supérieure en analyse limite.

## 2 MODELE D'ESSAI

Nous avons mis en point un modèle réduit [1] dont nous rappelons les parties essentielles :

- Une cuve contenant le massif de sable, dans laquelle on mobilise la butée au contact du pieu ;
- Un bâti permettant la mise en translation d'un écran sur lequel est fixé le pieu ;

- Une chaîne de mesure permettant de déterminer l'action du massif sur le pieu.

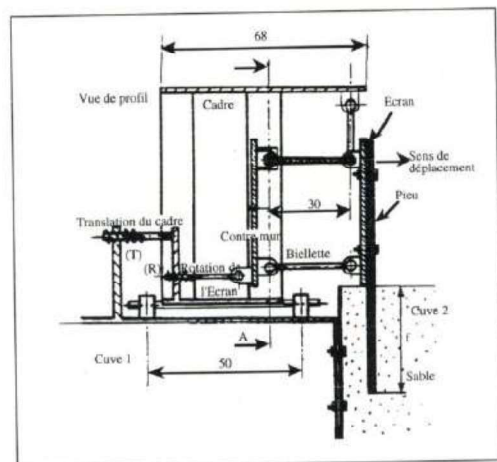


Figure 1 : Schéma en coupe du modèle réduit.

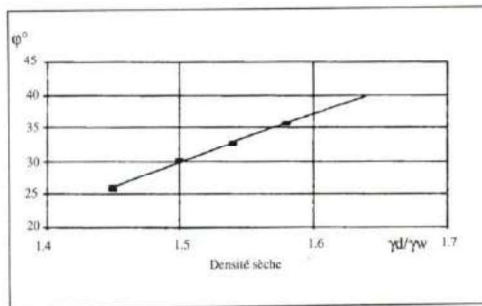
## 3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUE, GRANULOMETRIQUE ET MECANIQUE DU MATERIAU UTILISE

Nous avons utilisé un sable à granulométrie serrée, provenant des carrières d'Hostun (Drôme), dans la vallée du Rhône (France), dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 1 :

Désignation	Dimensions (mm)		Indice des vides	
	$d_{min}$	$d_{max}$	$e_{min}$	$e_{max}$
Sable 1	0,3	1	0,607	0,885

**Tableau 1 :** Caractéristiques du matériau

La relation entre  $\phi$  et la densité sèche  $\gamma_d/\gamma_w$  (Figure 2) de ce sable a été déterminé à la boîte de Casagrande [5]. Dans notre cuve, le sable a été compacté par piquetage pour obtenir une gamme de densité allant d'un état moyennement dense ( $\gamma_d/\gamma_w = 1.51$ ) à dense ( $\gamma_d/\gamma_w = 1.63$ ) ce qui correspond respectivement à des angles de frottement allant de  $31^\circ$  à  $38^\circ$ .



**Figure 2 :** Relation entre  $\phi$  et la densité sèche  $\gamma_d/\gamma_w$ .

## 4 RESULTATS EXPERIMENTAUX

### 4.1 Programme des essais

Pour l'ensemble des essais nous avons utilisés des pieux en acier de 30mm d'épaisseur.

Leur section a été choisie en fonction de la granulométrie du sable, de manière à éviter un effet d'échelle liée aux dimensions respectives des grains et des pieux [6][1].

Dans notre programme d'essais, nous nous sommes proposés de faire varier les paramètres suivants :

- la forme des pieux (carrée, rectangulaire) ;
- la fiche des pieux (12.5, 14.5, 19.5, 20, 29.5 et 30 cm) ;
- la largeur des pieux (1.5, 3, 5, 6, 9 et 10 cm) ;
- la densité du sable.

Notons que l'ensemble des pieux utilisés avaient un état de surface "lisse".

### 4.2 Courbes expérimentales

#### 4.2.1 Courbes effort-déplacement

La figure 3 présente l'évolution de l'effort total sur

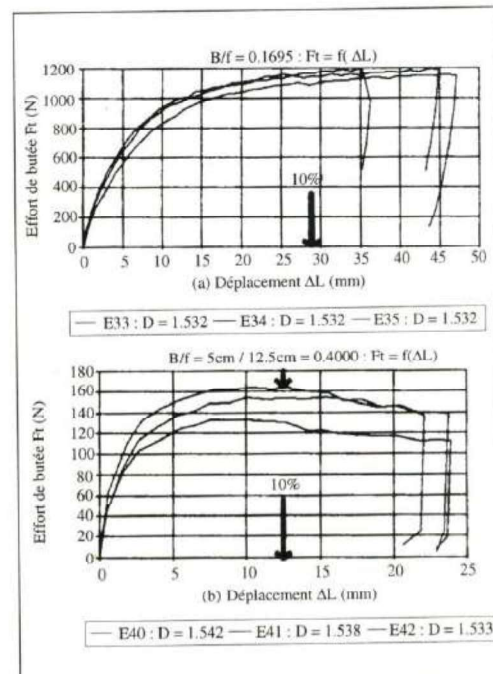
l'écran en fonction de son de déplacement en translation. On note deux comportements caractéristiques

- Pour les écrans élancés (lorsque le rapport de la largeur de l'écran B à sa fiche f est inférieur à 0.25), la courbe, après une augmentation rapide de l'effort, présente une pente toujours montante sans palier, dans les limites des déplacements que nous avons explorés (Figure.3a).
- Pour les écrans plus larges ( $B/f > 0.25$ ), les courbes présentent un pic suivi d'un palier (Figure.3b).

Ainsi, pour les écrans élancés, les courbes ne permettent pas de définir avec précision un seuil de butée ou de rupture : on a donc été amené à définir un critère de rupture arbitraire.

Plusieurs hypothèses ont été testées, et finalement nous avons retenu un critère par analogie avec les courbes présentant un pic.

En effet, l'examen de l'ensemble des courbes avec pic montre que celui-ci survient généralement pour des valeurs du déplacement relatif  $L/f$  voisin de 10%. C'est cette valeur que nous avons retenu comme critère pour définir le seuil de rupture dans le cas d'écrans élancés.



**Figure 3 :** Courbes  $F_t = f(\Delta L)$ .

#### 4.2.2 Evolution du coefficient de Butée

Rappelons que le coefficient de butée est calculé en supposant que la répartition des contraintes sur la hauteur de l'écran est triangulaire, comme c'est admis généralement pour les écrans continus.

Sur la figure 4, nous présentons quelques résultats typiques : les courbes ont la même allure que pour la variation de l'effort total en fonction du déplacement. On retrouve donc le comportement bien différencié en fonction de la largeur relative de l'écran :

- courbes sans pic avec palier linéaire final ascendant pour  $B/f < 0.25$  (Figure 4a)
- courbes avec pic pour  $B/f > 0.25$  (Figure 4b)

Cette différence correspond pour  $B/f > 0.25$  au développement d'un prisme de rupture sur toute la hauteur de l'écran, et pour  $B/f < 0.25$  à une zone plastifiée plus localisée. Dans ce qui suit, ces deux types d'essai seront qualifiés respectivement d'essais de rupture franche, et d'essai sans rupture franche.

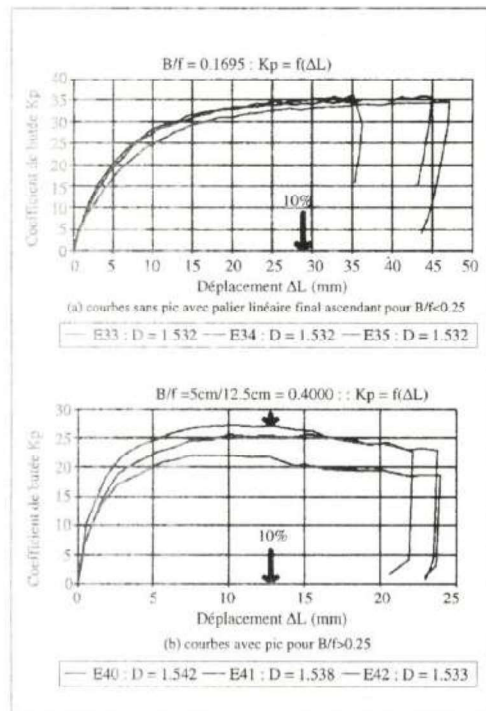


Figure 4 : Courbes  $K_p = f(DL)$ .

Notons que ces résultats rejoignent ceux de WEISSENBACH [3], pour qui une rupture franche apparaît pour une largeur relative de l'écran supérieure à 0.3.

#### 4.2.3 Evolution du point d'application et de l'inclinaison de l'effort résultant

Nous présentons ici quelques résultats relatifs à des essais sans rupture, puis avec rupture franche.

la figure 5 montre que le point d'application s'abaisse avec le déplacement dans le cas des essais sans rupture franche, alors qu'il reste sensiblement constant et égal à 30% de la fiche dans les essais avec rupture franche.

La figure 6 présente les courbes caractéristiques de l'évolution de l'inclinaison " $\delta$ " de la butée en fonction du déplacement du pieu.

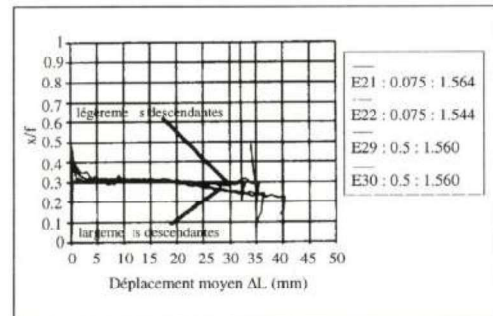


Figure 5 : Courbes  $x/f = f(DL)$ .

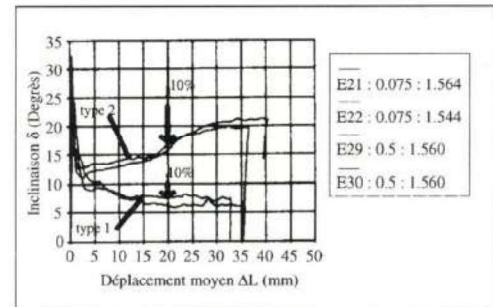


Figure 6 : Courbes  $\delta = f(DL)$ .

Pour les essais sans rupture, on obtient dans tous les cas l'allure type 1 (courbe décroissante avec le palier final), alors que pour les essais avec "rupture", on obtient les courbes du type 2 (courbe croissante). La différence entre les deux comportements survient pour un élanement  $B/f$  égal à 0.25.

La signification physique de ces résultats peut être vue de la manière suivante :

- type 1 : à la rupture, l'écran élané provoque un refoulement du sol dans un plan horizontal, ce qui explique que les efforts tangentiels soient fai-

bles et se stabilisent en un palier.

- type 2 : nous avons un mécanisme de rupture par prisme avec un mouvement ascendant comparable à celui observé dans le cas d'un écran bidimensionnel ; ceci explique une valeur de  $\delta$  croissante et élevée.

## 5 EXPLOITATION DES RESULTATS

### 5.1 Influence sur le coefficient de butée

Nous avons repris ici ce qui a été considéré comme critère de rupture pour l'effort total (10% sans rupture, pic pour rupture); pour examiner l'évolution du coefficient de butée  $Kp\gamma$  avec la largeur relative "B/f" (Figure 7). L'ensemble des résultats se répartit suivant un faisceau d'allure hyperbolique, le coefficient de butée partant de sa valeur bidimensionnelle pour augmenter très rapidement lorsque la largeur relative B/f est inférieure à 10 %.

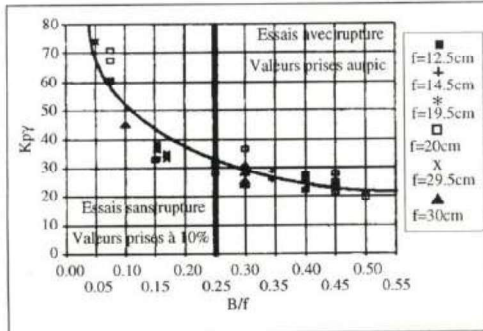


Figure 7 : Courbes  $Kp\gamma = f(B/f)$ .

La dispersion constatée est liée en partie aux légères variations de densité de mise en place du matériau. Mais, il convient de noter également que pour une largeur relative de 0.3, où deux longueurs de fiche différentes ont été utilisées, il apparaît que la valeur absolue de la fiche n'est pas sans influence sur le matériau sur le résultat.

Il est possible que cette variation du coefficient de butée  $Kp\gamma$  avec un élanement B/f constant soit due à l'effet d'échelle.

### 5.2 Influence sur la position de l'effort résultant

La figure 8 présente l'ensemble des valeurs " $x/f$ " pour tous les essais, aussi bien avec rupture franche ou sans, en fonction de la largeur B/f. Il y a lieu de noter que :

- les essais sans rupture franche donnent une position relative " $x/f$ " du point d'application de 0.294 (valeurs extrêmes 0.250 et 0.361).
- les essais avec rupture conduisent à une valeur moyenne de 0.313 (valeurs extrêmes 0.280 et 0.351).

Algérie EQUIPEMENT

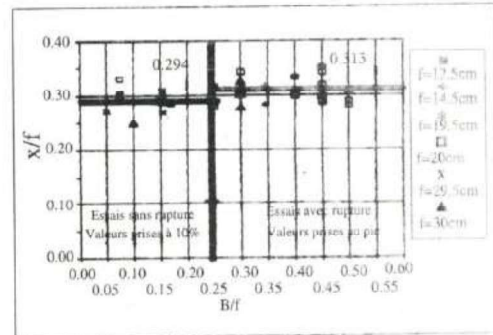


Figure 8 : Courbes  $x/f = f(B/f)$ .

On peut penser que le poinçonnement du sol par un pieu isolé élané ou non ne s'apparente pas totalement à la butée bidimensionnelle, qui correspond à une valeur théorique " $x/f$ " égale à 0.333 ; l'écart apparaît d'autant plus élevé que l'écran est élané.

### 5.3 Influence sur l'inclinaison de l'effort résultant

L'ensemble des résultats est résumé sur la figure 9 où la variation de " $\delta$ " est exprimée en fonction de la largeur relative B/f. On observe que  $\delta$  atteint près de 20° pour des écrans larges (soit  $\delta/f$  de l'ordre de 0.5 à 0.6). Par contre,  $\delta$  chute rapidement avec B/f pour descendre à 5° lorsque B/f est égal à 0.05. Ce résultat est assez logique, les écrans très élanés déplacent relativement peu de sol dans un mouvement ascendant. Il est vraisemblable que dans la partie basse de tels écrans, le sol est refoulé horizontalement de part et d'autre de l'écran ainsi que le suggère BRINCH-HANSEN [7]. Le sol ne remontant que devant la partie supérieure de l'écran, il en résulte un frottement global sol-écran très faible et tendant vers zéro lorsque B/f tend vers zéro.

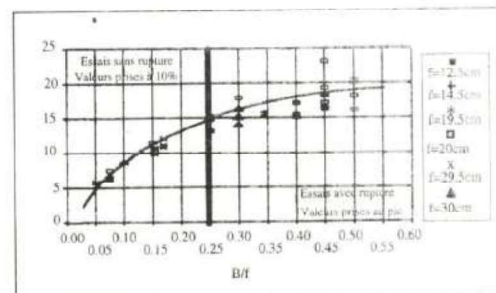


Figure 8 : Courbes  $\delta = f(B/f)$ .

## 6 COMPARAISON DES RESULTATS DES MODELES THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX

Dans le but de modéliser la butée expérimentale sur pieu (ou sur un écran de largeur limitée), nous

avons élaboré divers modèles suivant les critères de la borne supérieure qui sont le prolongement en milieu tridimensionnel du prisme de Coulomb et du mécanisme à deux triangles [8]. Nous donnons ci-après le principe de deux de ces modèles, ainsi que leur résultats finaux.

Les hypothèses générales communes à ces modèles sont les suivantes :

- sol non cohérent, limité par une surface libre horizontale ;
- écran vertical de largeur limitée, avec une valeur du frottement interne du sol ( $\delta/\varphi < 1$ ) ;
- mobilisation de la butée par translation de l'écran ;
- modèle avec un champ de vitesse cinématiquement admissible permettant le calcul suivant le principe de la borne supérieure en analyse limite.

Pour la butée tridimensionnelle, Chen [8] a étudié 6 mécanismes de rupture en analyse limite (Borne supérieure).

Parmi ceux-ci, nous avons retenu, comme base de nos mécanismes tridimensionnels, le mécanisme à deux triangles qui a donné les meilleurs résultats. Nous avons également testé le mécanisme de Coulomb en raison de sa simplicité.

### 6.1 Modèle tridimensionnel de Coulomb

Pour ce modèle, on considère un prisme monobloc dont la coupe verticale suivant un plan orthogonal au milieu de l'écran est un triangle (Figure 10). Sa construction doit respecter, en tout point de la surface de rupture, la condition d'angle  $\varphi$  entre le vecteur vitesse du prisme et la surface de rupture qui doit être égal à  $\rho$ .

Ce volume monobloc peut être découpé en quatre parties :

- la partie centrale (FF'BB'EE') qui est un prisme droit à base triangulaire ;
- les deux parties latérales au pieu, (AJFEID) et (A'J'F'E'D'), symétriques par rapport au pieu, ce sont des troncs de prisme à base triangulaire ;
- les deux parties latérales, (FGCE) et (F'G'C'E'), symétriques, ce sont des troncs de prisme droits à base triangulaire ;
- les deux troncs de cônes, (GCBE) et (G'C'B'E'), qui sont une belle illustration de la condition d'angle. La surface qui suit parfaitement cette condition n'est qu'un cône (Figure 10).

Tout calcul fait, il apparaît que la relation donnant le coefficient de butée tridimensionnel, peut se mettre sous la forme de :

$$K_{PY} = \frac{2 \cdot V}{B \cdot l^2 \cdot [\cos \delta \cdot \text{tg}(\alpha - \varphi) - \sin \delta]} \quad (1)$$

Où V est le volume total du prisme.

On obtiendra le coefficient de butée  $K_{PY}$  en le minimisant par rapport à la seule variable " $\alpha$ ", suivant la méthode du gradient sous contraintes.

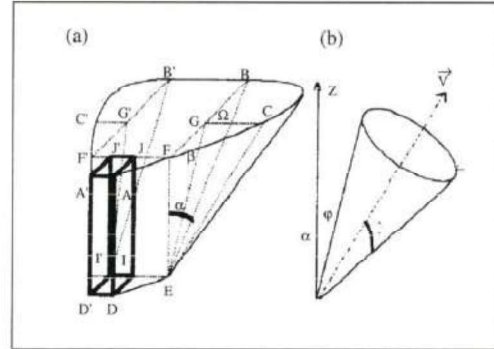


Figure 10 : a) Prisme de Coulomb, b) Condition d'angle  $\varphi$

Nous donnons ici quelques résultats sous forme de courbes pour un écran d'épaisseur nulle (Figure 11).

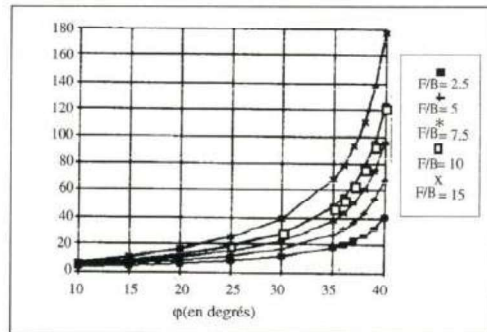


Figure 11 :  $K_{PY} = f(\varphi, \delta, B/f)$  pour  $\delta/\varphi = 0$ .

### 6.2 Prisme tridimensionnel à deux triangles

Pour ce modèle inspiré du mécanisme de rupture N°2 de Chen [8], on considère un prisme composé de deux blocs, dont la coupe verticale suivant un plan orthogonal au milieu de l'écran est une réunion de deux triangles (Figure 12). Sachant que l'on doit respecter la condition d'angle énoncée précédemment.

Nous donnons ici comme pour le modèle de Coulomb, tout calcul fait l'expression du coefficient de butée :

$$K_{PY} = \frac{2 \cdot \left[ V_1 + V_2 \cdot \frac{\sin(\Omega + \varphi) \cdot \sin(\alpha + \beta - 2 \cdot \varphi) \cdot \text{tg}(\alpha - \varphi)}{\sin(\alpha - \varphi) \cdot \cos(\beta - \Omega - 2 \cdot \varphi)} \right]}{B \cdot l^2 \cdot [\cos \delta \cdot \text{tg}(\alpha - \varphi) - \sin \delta]} \quad (2)$$

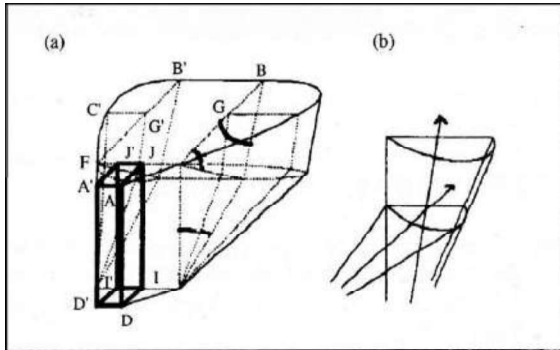


Figure 12 : a- mécanisme à deux triangles.  
b - Enchevêtrement des cônes

On obtiendra le coefficient de butée  $K_{py}$  en le minimisant, avec la méthode du gradient sous contraintes, par rapport aux seules variables " $\alpha$ ", " $\beta$ " et " $\Omega$ ". Nous donnons aussi quelques résultats, sous forme d'abaque, pour un écran d'épaisseur nulle (Figure 13).

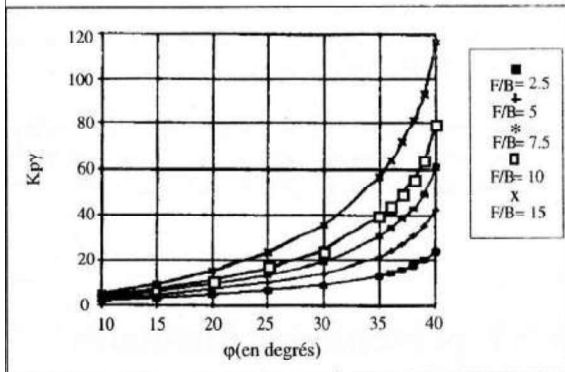


Figure 13 :  $K_{py} = f(\phi, \delta, B/f)$  pour  $\delta/\phi = 0$ .

## 7 COMPARAISONS EXPERIMENTALE ET THEORIQUE

### 7.1 Comparaison des coefficients de butée

Si le modèle à deux triangles apparaît meilleur, puisqu'il donne des valeurs inférieures au modèle de Coulomb, (bien qu'intéressant par sa simplicité), en particulier pour des angles de frottement de sol élevés, les résultats restent cependant proches (Figures 14).

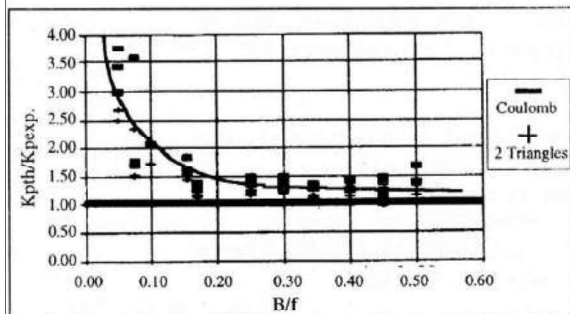


Figure 14 : Comparaison expérimentale et théorique avec les modèles de Coulomb et à deux triangles.

Comparés aux valeurs expérimentales, ils constituent bien une borne supérieure, avec toutefois une divergence nette pour les écrans élancés. On remarque que pour  $B/f$  inférieur à 0.215, les modèles surestiment très fortement la butée expérimentale.

### 7.2 Comparaison des formes et des valeurs

L'ampleur du prisme de rupture peut être apprécié à partir de sa trace à la surface du massif pour des écrans larges (Figures 15a).

La comparaison de cette trace avec les prismes théoriques met bien en évidence les limites du modèle de Coulomb et la bonne approximation donnée par le mécanisme à deux triangles.

Par contre, pour les écrans très élancés (Figure. 15b), on note que la trace du volume de rupture donnée expérimentalement, apparaît très réduite par rapport aux modèles théoriques qui ne conviennent plus. Tout se passe comme s'il avait développé d'un prisme devant la partie supérieure de la fiche, avec un mécanisme de poinçonnement local en profondeur. Les observations confirment et expliquent les divergences observées quant à la valeur des coefficient de butée lorsque  $B/f$  est inférieur à 0.15.

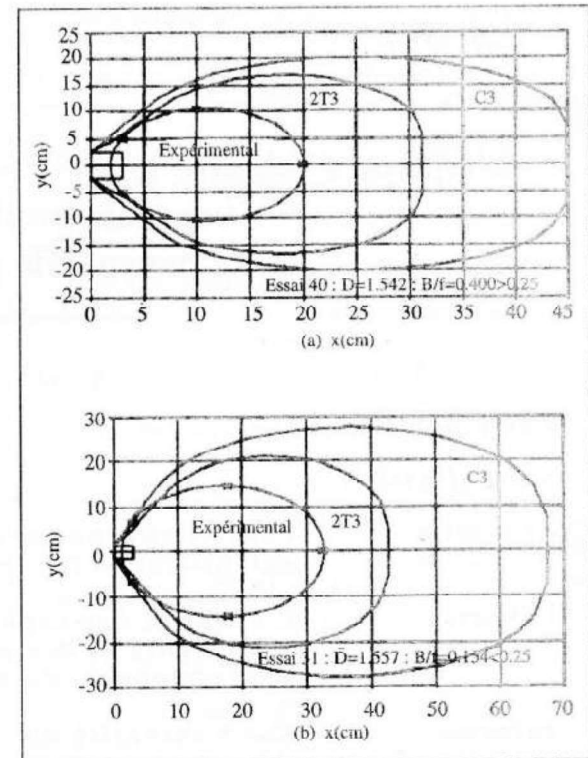


Figure 15 : Comparaison des traces à la surface du massif des prismes de rupture expérimentale et théorique.

## 8 CONCLUSION

L'étude expérimentale sur modèle de la butée sur écran de largeur limitée a permis de confirmer et de

préciser les résultats obtenus par d'autres auteurs.

Cette étude a montré notamment que l'élanement relatif  $B/f = 0.25$  constitue une frontière entre deux mécanismes de rupture.

Les modèles théoriques développés suivant le principe de la borne supérieure en analyse limite correspondent aux pieux de largeur relative  $B/f > 0.25$ . Ils conduisent à une très forte surévaluation de la butée pour des largeurs relatives inférieures à 0.15. Le mécanisme à deux triangles constitue, tant du point de vue des valeurs de la butée que du volume du prisme de rupture, une bonne approximation du comportement observé sur le modèle.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Belabdelouahab : "Etude expérimentale de la butée discontinue sur modèle réduit". Thèse de doctorat INSA Lyon, 1988.
- [2] H. Blum : "Wirtschaftliche Dalbernformen und deren Berechnung"- Bautechnik. Vol.9, Heft 5, 1932.
- [3] A. Weissenbach : "Der Erdwiderstand vor schmalen Druckflächen". Thèse de docteur-ingénieur, Franzius Institut, Hannover, 338 pages. 1961.
- [4] A. Horn : "Räumlicher Erdwiderstand in nicht Bindungen B den". V.O.N. Zeitschrift 109, 1967.
- [5] Y. Bourdeau : "Poussée des sols pulvérulents, influence des caractéristiques des sols et du modèle d'essai". Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INSA de Lyon, 1977.
- [6] J. Kerisel : "Le langage des modèles en mécanique des sols". Proc. of the 5th European Conf. on Soil Mechan. and Found. Engineering, Madrid, Vol.2, 1972.
- [7] J. Brinch-Hansen : "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces". Géotechnik Institut, Copenhagen, Bull. 12, 1961.
- [8] W.F. Chen : "Limit analysis and soil plasticity". Amsterdam : Elsevier, 637 pages, 1975.
- [9] M. Meksaouine, R. Kastner : "Etude expérimentale et théorique de la poussée passive sur pieux rigides". Colloque de mécanique des sols appliquées, ENSG-Nancy, 1992.
- [10] M. Meksaouine : "Etude expérimentale et théorique de la poussée passive sur pieux rigides". Thèse de Docteur de l'INSA de Lyon, 1993.

## L'équipe d'Algérie EQUIPEMENT présente ses meilleurs vœux de bonheur, de santé et de prospérité pour l'année 1998

Chers lecteurs,

Cette publication est la vôtre.

Ses objectifs :

<b>Travaille</b>	<b>Pour le rayonnement et le développement scientifique et technique de l'université.</b>
<b>Favorise</b>	<b>L'échange des expériences, des résultats de recherches et des multiples réalisations de professionnels du génie-civil.</b>
<b>Informe</b>	<b>Sur l'actualité du secteur de l'équipement, du déroulement des journées, séminaires et congrès scientifiques et techniques.</b>

**DANS L'INTERET DE L'UNIVERSITE ALGERIENNE  
DE L'AN 2000 ABONNEZ-VOUS**

**la rédaction**