

# INTERACTION BUTEE DES RIDEAUX EN VIS-A-VIS

## INTERACTION ANALYSIS ON PASSIVE PRESSURE OF ABUTMENT BETWEEN TWO OPPOSITE RETAINING WALLS

Christophe JASSIONNESSE<sup>1</sup>, Martin CAHN<sup>1</sup>, Alkisti TSIROGIANNI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GEOS INGENIEURS CONSEILS, Archamps, France

**RÉSUMÉ** – Dans le cas d'écrans de soutènement en vis-à-vis, l'interpénétration des deux mécanismes de butée soulève le cône de terrain situé dans la zone de croisement et modifie les valeurs de butée limites. Cet article présente les développements analytiques et les modélisations numériques utilisés pour mettre en évidence le phénomène.

**ABSTRACT** – In the case of opposite retaining walls, the interpenetration of the two passive pressure mechanisms lifts the ground cone situated in the crossing area and modifies its limit values. This article presents the analytical developments and numerical models used to highlight the phenomenon.

### 1. Introduction

L'annexe F de la norme française sur les écrans de soutènement NFP-94-282 précise que, lorsque la largeur de l'excavation est inférieure à trois fois la longueur de transfert, « l'interpénétration des cônes de butée se traduit par une valeur plus élevée du coefficient de réaction ». La présence de deux écrans en vis-à-vis peut donc modifier les mécanismes de butée en fond de fouille.

Si la valeur de la butée mobilisée est augmentée dans le cas de fouilles « étroites » les valeurs de butées limites utilisées classiquement et préconisées dans les Eurocodes restent celles déterminées expérimentalement et analytiquement pour des milieux semi-infinis et pour un écran unique.

Cet article présente le développement d'une méthode de type équilibre limite en milieu continu tenant compte du soulèvement du cône de terrain situé dans la zone de croisement des coins de butée dans le cas de deux écrans en vis-à-vis. Les résultats sont comparés à des modélisations éléments finis en forces et déplacements imposés.

Les difficultés de modélisation rencontrées avec les deux modèles numériques ainsi que les concordances et les divergences des approches sont discutées.

### 2. Modèles numériques et mise en évidence du soulèvement du coin situé dans la zone d'interaction

Les modélisations numériques par éléments finis ou différences finies peuvent être utilisées pour étudier les mécanismes de poussée active ou de butée passive (Shiau et Smith, 2006 ; Mokhbi et Messaset, 2014).

Dans cet article, le logiciel éléments finis en déformation plane PLAXIS 2D est utilisé avec des éléments triangulaires à 15 nœuds. Deux types de modélisations sont mises en œuvre : l'une en déplacements imposés, l'autre en forces imposées.

Les modèles représentent la demi-largeur d'une fouille de largeur totale B et correspondent ainsi au cas de fouilles symétriques. Les déplacements ou forces sont imposés au bord latéral gauche du modèle sur la hauteur H correspondant à la hauteur de l'écran. La limite inférieure est bloquée en x et en y tandis que la limite latérale droite est bloquée en x et libre en y.

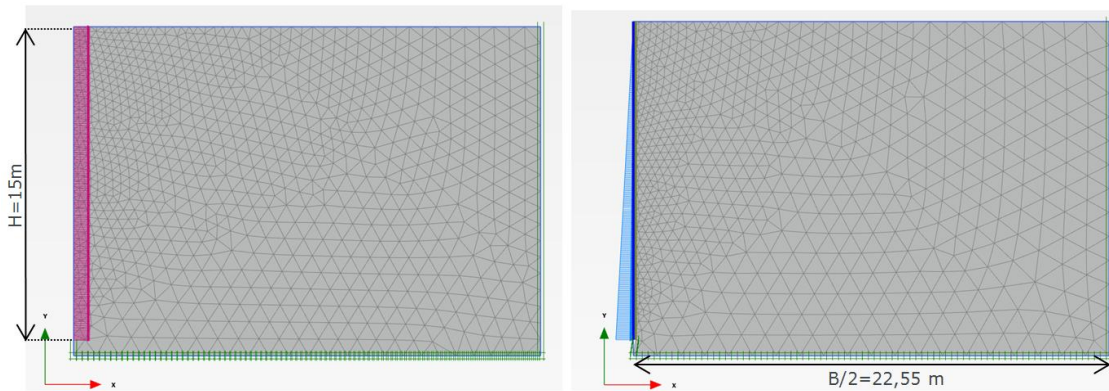


Figure 1. Exemple de modèles Plaxis 2D en déplacements et en forces imposés

Une bande de sol de hauteur  $H/20$  est conservée entre la base de l'écran et la base du modèle. Celle-ci joue le rôle « d'interface » et permet la limitation de la plasticité sous le pied de fiche. Les modélisations ont été réalisées avec un sol purement frottant doté d'une loi de comportement élastoplastique parfait Mohr-Coulomb ( $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  et  $\phi = 30^\circ$ ). Des lois d'écoulement associées et non associées avec un sol non dilatant sont utilisées.

L'écran est supposé infiniment rigide, aucune surcharge n'est considérée et la surface libre est prise horizontale.

### 2.1 Modèle en déplacements imposés-Simple rideau

Le modèle comporte deux phases : une phase initiale de génération des contraintes géostatiques et une phase où les déplacements sont directement imposés aux nœuds correspondant à la hauteur de l'écran. La force de réaction horizontale totale  $F_x$  associée au déplacement imposé est calculée à chaque pas de calcul. Cette force atteint un palier lorsque la butée limite est obtenue.

Le coefficient de butée est déterminé tel que 
$$K_p = \frac{2 \times F_x}{\gamma \times h^2}$$

Dans le cas du simple rideau ( $B=150\text{m}$ ), les coefficients de butée suivants sont déterminés :

Tableau 1. Résultats des modélisations simple rideau en déplacements imposés

	Loi d'écoulement non associée $\psi=0^\circ$	Loi d'écoulement associée
$F_x$ (kN)	6322	6897
$K_p$	2,81	3,07

Les valeurs sont proches de la théorie avec un écart de 6% et de 2% respectivement pour la loi d'écoulement non associée et associée.

### 2.2 Modèle en forces imposées-Simple rideau

Le rideau est modélisé comme un élément plaque infiniment rigide sans poids.

Une loi de comportement élastique est attribuée à l'interface entre le sol et l'écran avec un module d'Young égal à celui du sol ( $E=20 \text{ MPa}$ ). Son introduction, nécessaire pour modéliser l'écran rigide, implique de considérer une interface « relativement rugueuse » : la raideur de cisaillement introduite permet un mouvement relatif entre l'écran et le massif qui se traduit par une inclinaison de la butée.

Le modèle ne comporte à nouveau que deux phases : une phase initiale de génération des contraintes géostatiques et une phase où la force triangulaire - variant de 0 à  $f_x$  - est

appliquée sur la paroi rigide. Cette force est augmentée jusqu'à obtenir divergence du modèle.

Le coefficient de butée est alors déterminé tel que  $Kp = \frac{f_x}{\gamma \times h}$

Pour le simple rideau, les coefficients de butée suivants sont déterminés :

Tableau 2. Résultats des modélisations simple rideau force imposée

	Loi d'écoulement non associée $\psi=0^\circ$	Loi d'écoulement associée
$f_x$ (kN/m)	892	1056
$Kp$	2,97	3,52

Avec la loi d'écoulement non associée, une différence de 1% est déterminée par rapport à la valeur théorique pour une obliquité des contraintes nulle sur l'écran. Un écart de 17% est trouvé pour le modèle avec loi d'écoulement associée.

Avec ce dernier, le rideau se soulève et une concentration de contrainte est retrouvée à la base de l'écran. Le cisaillement à l'interface est ainsi important et génère une inclinaison des contraintes. Le modèle avec sol non dilatant permet lui d'obtenir une rotation de l'écran autour du pied tandis que la contrainte dans le terrain est plus homogène.

### 2.3 Mise en évidence de la cinématique du soulèvement de coin de butée.

Dans le cas de fouilles étroites, les différents modèles utilisés montrent un soulèvement du terrain au niveau de la zone d'interpénétration des coins de butée ainsi que des ruptures le long de bandes de cisaillement au niveau du cône qui se soulève. Ces dernières peuvent être mises en évidence à l'aide des isovaleurs de déformation incrémentale de cisaillement (Leśniewska et Mórz, 2003). La figure suivante présente les résultats obtenus pour le modèle en déplacements imposés avec le sol non dilatant et pour une largeur de fouille égale à deux fois la hauteur de la fiche ( $B/H=2$ ).

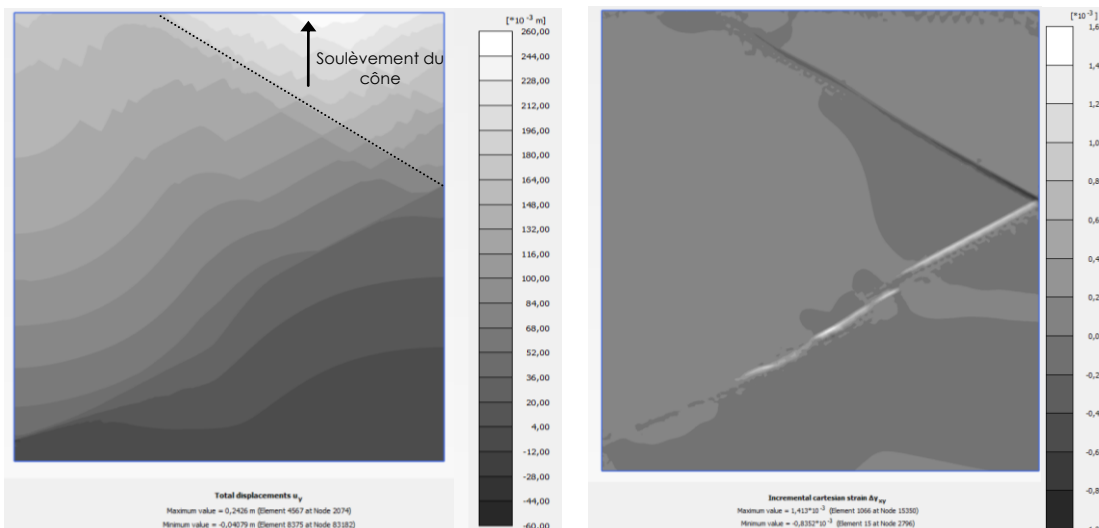


Figure 2. Déplacements verticaux totaux et déformations incrémentales de cisaillement ( $B/H=2$ )

Les deux bandes de cisaillement peuvent être approximées par des droites. Toutes deux font un angle de  $60^\circ$  par rapport à la verticale ce qui correspond donc à  $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ .

### 3. Développements analytiques

Pour tenter d'expliquer les observations du paragraphe précédent et en partant de l'idée que le poids d'un volume de sol ne peut pas « travailler deux fois » sans que la force stabilisatrice qu'il apporte ne soit modifiée, une méthode analytique simplifiée de type équilibre limite en milieu continu a été développée.

#### 3.1. Théorie du coin de Coulomb modifiée

La méthode est basée sur la théorie du Coin de Coulomb. Elle consiste en l'étude de l'interaction des deux mécanismes de butée pour différentes largeurs de fouilles.

L'interpénétration des deux mécanismes de butée ayant tendance à soulever le cône de terrain situé dans la zone de croisement, l'équilibre du coin est étudié en considérant que toute hauteur en interaction constitue une surcharge. La force de butée minimale est alors recherchée pour tous les angles d'inclinaison physiquement admissibles.

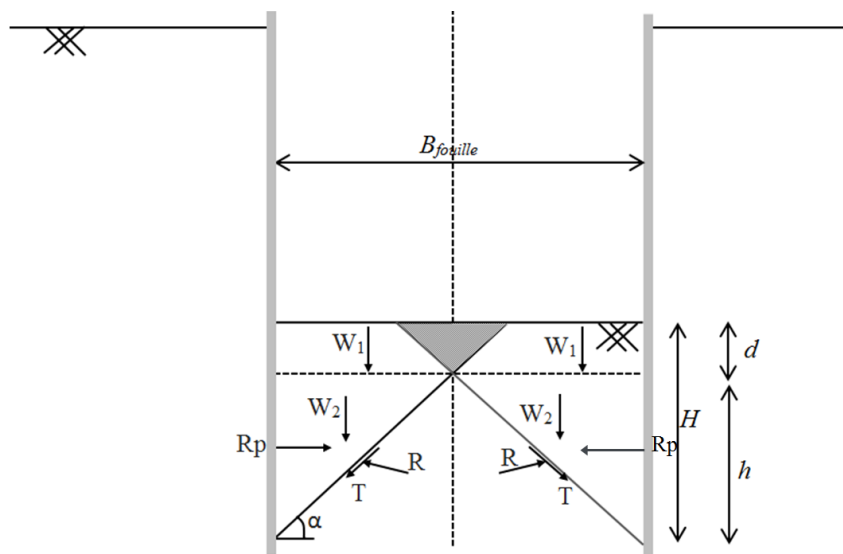


Figure 3. Schéma pour la théorie du coin de Coulomb modifié

##### 3.1.1 Angle physiquement admissible et angle d'interaction

L'angle d'inclinaison minimal considéré est celui pour lequel la surface de rupture aboutit en fond de fouille contre le rideau opposé : pour des angles inférieurs, le problème est indéterminé par la réaction du rideau opposé. On considère ainsi que des angles de rupture inférieurs à  $\alpha_{\min}$  ne sont pas physiquement admissibles.

Au-delà de l'angle  $\alpha_{\text{int\_max}}$ , aucune interaction n'est considérée et l'équilibre du coin est étudié de façon classique, sans surcharge.

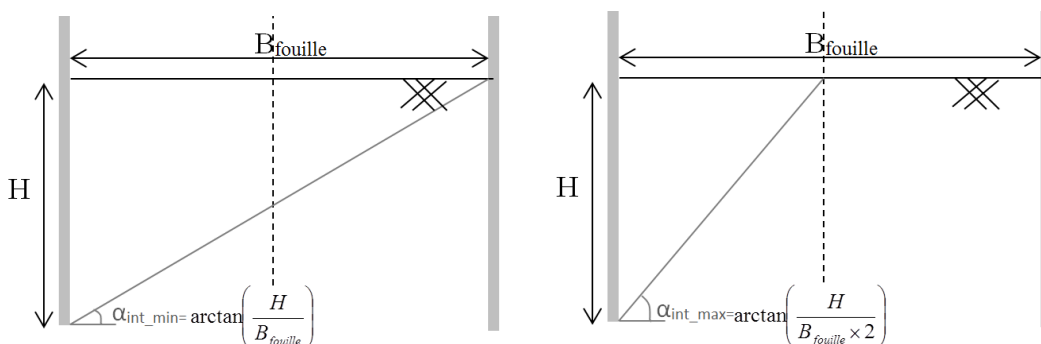


Figure 4. Angles limites de l'interaction

### 3.1.2 Equilibre du coin avec interaction

On considère le cas général d'un sol cohérent-frottant de poids volumique  $\gamma$ .

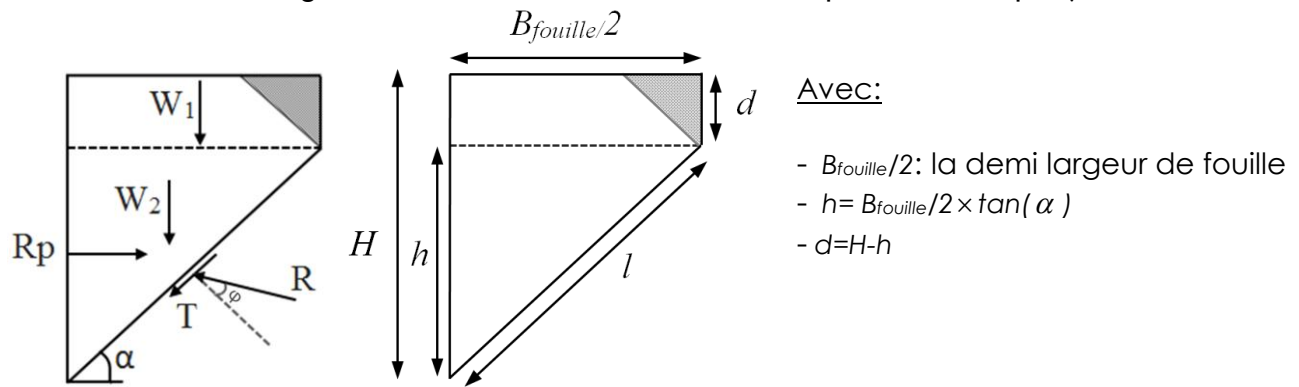


Figure 5. Equilibre des forces et géométrie du coin avec interaction

La projection des forces sur la normale à la réaction R permet d'exprimer la résultante de la butée  $R_p$  telle que :

$$R_p = (W_1 + W_2) \tan(\alpha + \varphi) + \frac{c \times l}{\cos(\alpha) - \sin(\alpha) \tan(\varphi)}$$

Avec

- $W_2 = 1/4 \times \gamma \times h \times B_{fouille}$
- $W_1 = \gamma \times d \times B_{fouille} / 2 + c \times d$

Dans le cas d'un sol cohérent frottant, la composante verticale du cisaillement dû à la cohésion du cône d'interaction est ajoutée dans le terme de surcharge  $W_1$ .

En supposant l'unicité du coefficient de butée entre sol pesant pulvérulent et sol cohérent, un coefficient de butée équivalent est déterminé :

$$K_p^* = \left( 2 \times R_p - \frac{2 \times c \times \cos(\varphi)}{(1 - \sin(\varphi))} \right) \times \frac{1}{\gamma H^2}$$

### 3.1.3 Résultats de l'approche analytique

Les figures suivantes présentent l'évolution du coefficient de butée équivalent en fonction du rapport largeur de fouille/ hauteur de fiche.

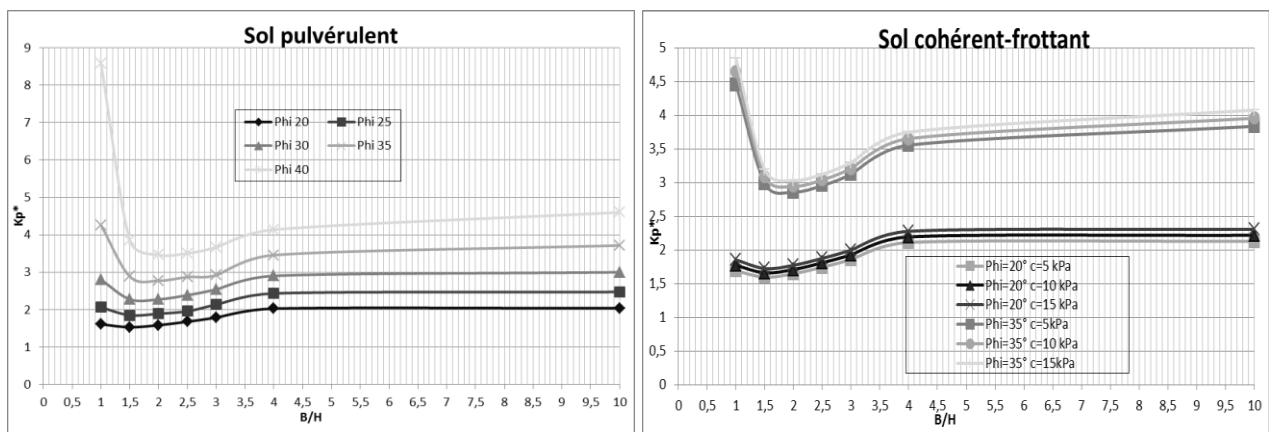


Figure 6. Evolution du coefficient de butée équivalent pour un sol pulvérulent et pour un sol cohérent/frottant

Ces deux graphiques montrent qu'en fonction de la distance entre les parois et suivant les cas, la butée mobilisable peut être soit augmentée, soit réduite. L'augmentation de la butée mobilisable n'a lieu qu'avec des angles de frottement élevés et pour des fouilles de largeur réduite.

#### 4. Comparaison avec les modélisations éléments finis

Le modèle présenté au paragraphe 2 est utilisé pour comparaison. Les deux types de modélisations – en forces et déplacements imposés – ainsi que les deux types de lois d'écoulement sont dans un premier temps comparés pour une fouille de largeur  $B=30$  m. Les valeurs numériques déterminées dans le cas d'un écran unique sont prises en référence.

##### 4.1 Divergence des différentes modélisations

Avec une fiche de 15 m de hauteur, une largeur de fouille de 30 m et un angle de frottement de  $30^\circ$ , le modèle analytique prévoit une diminution du coefficient de butée de 31,9%.

Cette diminution n'apparaît pas avec l'ensemble des modèles utilisés :

Tableau 3. Résultats des différents types de modélisation

Type de modèle	Kp simple rideau	Kp pour B=30 m	% de diminution / modèle numérique simple rideau
Modèle en force imposée Loi d'écoulement associée	3,52	3,45	1,9
Modèle en force imposée Loi d'écoulement non associée ( $\psi=0^\circ$ )	2,97	2,59	14,9
Modèle en déplacements imposés Loi d'écoulement associée	3,07	3,01	1,7
Modèle en déplacements imposés Loi d'écoulement non associée ( $\psi=0^\circ$ )	2,81	2,76	1,8

Ainsi, quand bien même la cinématique du soulèvement du cône de terrain situé dans la zone d'interaction est retrouvée avec l'ensemble des modèles, seul celui en force imposée et loi d'écoulement non associée approche la forte diminution déterminée avec le modèle analytique.

Notre interprétation de ces divergences est la suivante :

De façon générale, dans les calculs éléments finis, la rupture se traduit par un défaut d'équilibre en force imposée ou par une diminution de la réaction entre deux pas de calculs successifs en déplacements imposés. Dans le cas des modèles en force imposée, le calcul ne diverge pas car, à chaque étape, le déplacement est imposé de manière incrémentale mais la force horizontale totale continue d'augmenter. Ce faisant, on impose une cinématique qui ne correspond pas à celle de la rupture et, les modèles en déplacements imposés ne permettraient donc pas d'identifier la rupture du cône de terrain qui se soulève dans la zone de croisement et limite la butée mobilisable.

Pour le cas des sols avec loi d'écoulement associée, la dilatance semble empêcher que le cône de terrain dans la zone d'interaction « décroche » et que la butée mobilisable soit modifiée.

##### 4.1 Comparaison pour différentes largeurs de fouille

Le modèle en force imposée et sol non dilatant est utilisé pour comparaison avec le modèle analytique pour différentes largeurs de fouilles.

Les résultats des modèles éléments finis et de l'approche analytique montrent une bonne concordance : les différences entre les deux approches sont comprises entre 18 % et moins de 1%.

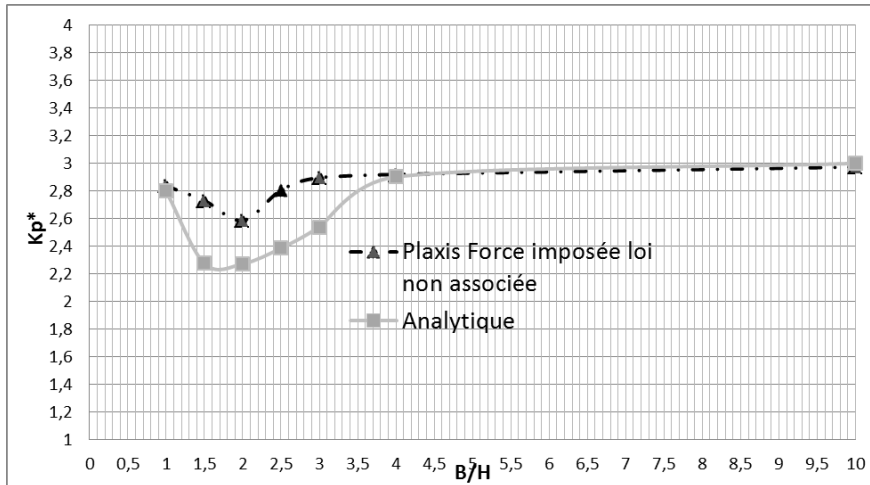


Figure 7. Comparaison entre les résultats des modélisations numériques en force imposée pour sol pulvérulent et non dilatant ( $\phi=30^\circ$  et  $\psi=0^\circ$ ) et le modèle analytique

La figure 8 présente la répartition de la plasticité déterminée pour les différentes largeurs de fouilles. Celle-ci met en évidence que, dans le cas de fouilles étroites, la rupture du cône de terrain en interaction semble se produire avant celle du coin de butée.

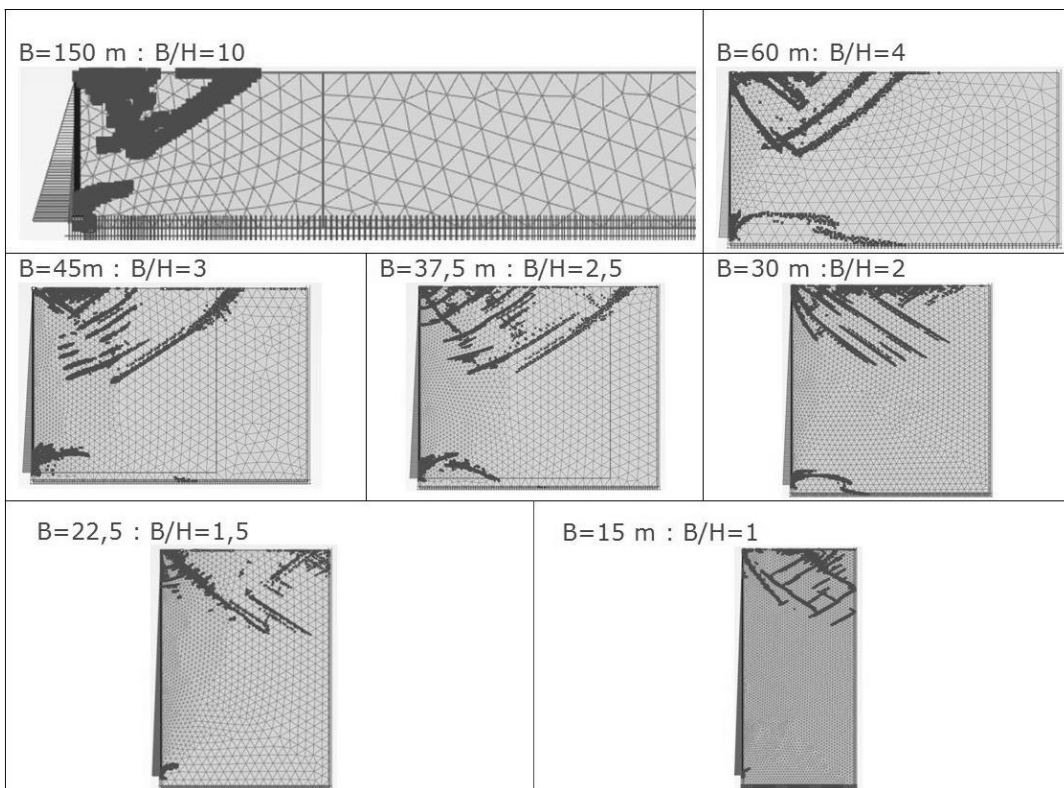


Figure 8. Points plastiques pour les différentes largeurs de fouille

La figure précédente montre également que la rupture du cône se fait selon plusieurs bandes de cisaillement. Au lieu de la rupture d'un cône rigide qui se soulève en bloc, cette dernière suggère qu'un multi-mécanisme avec plusieurs blocs doit être considéré.

Comme déjà évoqué au paragraphe 2.2, l'introduction d'un écran rigide implique la mise en œuvre d'une interface « relativement rugueuse ».

Ces deux remarques pourraient expliquer la différence entre les résultats numériques et analytiques.



## 5. Conclusions

Cette communication développe l'idée que la butée mobilisable est modifiée lorsque deux rideaux se font face : les angles d'inclinaisons limites des coins sont différents des valeurs classiques et dans la zone d'interaction, le cône de terrain se soulève. La cinématique de ce soulèvement peut être identifiée simplement par modélisation éléments finis.

Un modèle analytique de type équilibre limite, basé sur la théorie du coin de Coulomb est développé. Celui-ci montre qu'en fonction des cas, la butée limite peut être soit augmentée soit réduite.

Les modèles éléments finis en déplacements imposés qui sont couramment utilisés pour étudier la butée passive ou la poussée active ne semblent pas adaptés pour mettre en évidence une modification du coefficient de butée limite. Seuls les modèles en forces imposées pour un sol non dilatant ont permis de traduire les tendances identifiées avec le modèle analytique. Cette conclusion a par ailleurs été retrouvée en utilisant d'autres hypothèses de modélisation : loi de comportement HSM avec limitation de dilatance, conditions aux limites différentes avec modèle prolongé vers le bas et application directe de la force sur le massif (traduisant le cas d'un écran infiniment souple). Si les tendances restent les mêmes, les valeurs de butées déterminées sont cependant relativement différentes de celles présentées au tableau 3.

Ces différences entre les différentes modélisations numériques et avec le modèle analytique montrent que la détermination du coefficient de butée modifié n'est pas aisée. Des validations restent à mener, notamment dans le cas des sols cohérents pour lesquels la théorie du coin de Coulomb avec des plans de cisaillements rectilignes est trop simplificatrice. De même, des modélisations numériques ou des modèles physiques seraient nécessaires pour vérifier que le coefficient de butée limite peut être augmenté dans le cas des fouilles étroites et pour des angles de frottement élevés.

D'un point de vue pratique, il conviendra de comparer l'intensité des déplacements nécessaires à la mobilisation de la butée, réduite ou non.

## 5. Références bibliographiques

- Caquot A., Kérisel J ; (1956) *Traité de mécanique des sols*. 558 p, 3ème édition, Gauthier-Villars,
- Filliat G (1981) *La pratique des sols et des fondations*. 1392 p. Edition du Moniteur
- Kérisel J, Absi E (2003) Tables de butée et de poussée. 220 p , 2m édition ,Presses des Ponts,
- Leśniewska D., Mórz Z. (2003). *Shear bands in soil deformation processes*. Bifurcation & Instabilities in Geomechanics, Labuz & Drescher (eds.) Swets & Zeitlinger, pp. 109-119
- Mokhbi H., Messaset S. (2014) *Etude numérique de la pousée et de la butée des terres*, Courrier du Savoir, pp. 31-40
- Schlosser F (1975) – Ouvrages de soutènement Poussée et butée, Techniques de l'Ingénieur Ref C242
- Shiau J., Smith C. (2006), *Numerical analysis of passive earth pressures with interfaces*, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, C.A.Mota Soares et.al (eds)
- Tcheng Y., ISEUX J. (1971), Essais de butée en vraie grandeur, Le comportement des sols avant la rupture- Journées nationales de la mécanique des sols et des fondations.