

# MODELISATION NUMERIQUE DE L'INFLUENCE DU GRADIENT HYDRAULIQUE SUR LA STABILITE DES PAROIS

N. Khezzar<sup>(\*)</sup>, S. Benmebarek<sup>(\*)</sup> et R. Kastner<sup>(\*\*)</sup>

\* *Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie; Tél.: + (04)74.20.72,  
E-mail: [Benmebarek\\_Sadok@Yahoo.fr](mailto:Benmebarek_Sadok@Yahoo.fr)*

\*\* *URGC-Géotechnique, INSA de Lyon, France, Tél. : +(04)72.43.87.91,  
E-mail: [geot@insa-lyon.fr](mailto:geot@insa-lyon.fr)*

## RESUME

Cet article s'intéresse à la stabilité des grandes excavations dans les sables soumis à l'écoulement d'eau vers l'excavation. Le collapse de la structure de soutènement peut être provoqué par deux modes. Le premier correspond à la liquéfaction du sable quand le gradient ascendant dépasse le gradient critique. Le second mode provoque le soulèvement d'un prisme du sable adjacent à la face de la paroi par les forces d'écoulement d'eau. Dans le but de contribuer à l'amélioration des conceptions permettant d'éviter ce type de collapses et d'étudier plus précisément l'influence des infiltrations d'eau sur la butée, on présente une comparaison entre les méthodes simplifiées et les résultats de modélisation numérique par le logiciel FLAC 3.4 (version 1998) en différences finies explicites spécialisé en géotechnique.

## 1- INTRODUCTION

Dans les milieux perméables, l'infiltration d'eau vers le fond de fouille est la source principale de désordres. Ce travail s'intéresse à la stabilité des excavations qui sont le sujet d'un écoulement d'eau. Pour mener à bien cette recherche, une étude détaillée des écoulements a été passée en revue, ainsi que les différents phénomènes de rupture notamment le soulèvement et la bouillonnance. Plusieurs méthodes qui tiennent compte de l'écoulement d'eau sont exposées. Ces méthodes peuvent être classées en trois approches. La première est basée sur le choix d'un gradient constant. La seconde approche est basée sur le gradient hydraulique réel. Sa distribution est obtenue à partir des graphiques de réseaux d'écoulement ou des analyses numériques. La troisième approche considère une forme spirale de la surface de rupture et d'un coefficient de butée réduit. Une comparaison de ces approches est présentée dans cet article.

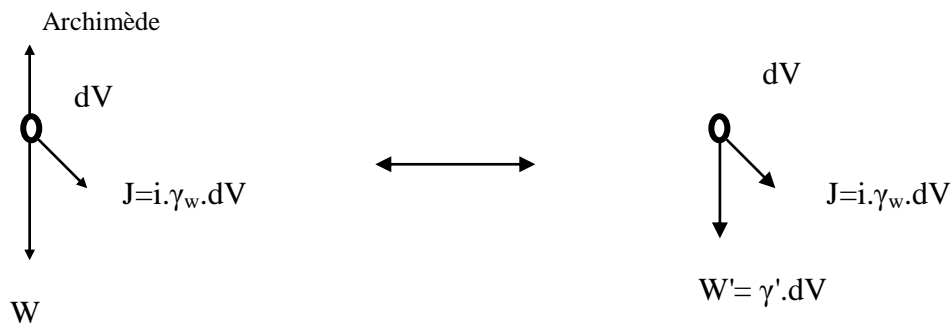
## 2 -INFLUENCE DES FORCES D'ECOULEMENT

Les eaux souterraines en écoulement exercent une poussée appelée force d'écoulement ou force de filtration sur les obstacles que représentent les grains solides. Cette force joue un rôle considérable dans les problèmes de stabilité des massifs de sol. Sa direction en chaque point est dans le sens de l'écoulement et son intensité par unité de volume est donnée par la formule:

$$J = \gamma_w \cdot i \quad (1)$$

Un massif élémentaire de sol  $dV$  baignant dans une nappe en écoulement est soumis à trois forces massiques (Fig.1 (à savoir:

- Son poids  $W = \gamma_{sat} \cdot dV$ ;
- La poussée d'Archimède  $A = \gamma_w \cdot dV$ ;
- La force totale d'écoulement  $j : j = j \cdot dV = i \cdot \gamma_w \cdot dV$



**Figure 1** :Forces massiques s'exerçant sur un élément de sol

Ces trois forces peuvent être réduites à deux en considérant le poids volumique immergé du sol:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

A proximité immédiate du rideau, les lignes de courant sont quasi verticales. Côté aval, le sol est soumis à :

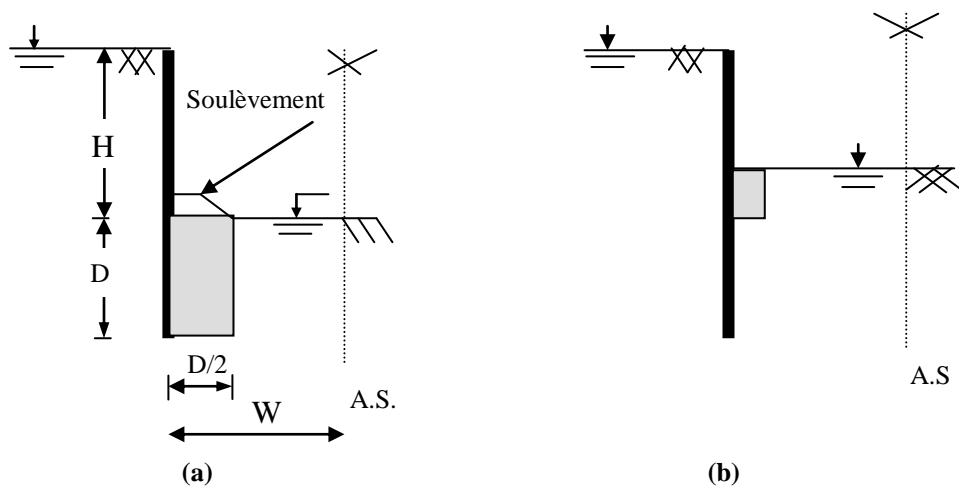
- Une force de pesanteur descendante  $\gamma' \cdot dV$
- Une force d'écoulement verticale ascendante  $i \cdot \gamma_w \cdot dV$

Si  $i > i_{cr} = \gamma' / \gamma_w$  le sol a tendance à se soulever et à être entraîné par le courant : on dit qu'il y'a un phénomène de renard.

Le gradient critique ( $i_{cr} = \gamma' / \gamma_w$ ) (est le gradient hydraulique pour lequel la résultante de ces forces est nulle.

### 3- TRAVAUX ANTERIEURS

Terzaghi et Peck [1] ont étudié une des formes d'instabilité connue par 'piping'. Ce phénomène est spécialement observé en excavation après le rabattement de la surface d'eau jusqu'au fond de fouille. A partir des tests sur un modèle, ils ont observé que la rupture du fond de fouille résulte du soulèvement d'un élément de sol de forme prismatique adjacent à la paroi. La profondeur de ce prisme est égale à la longueur de la fiche de la paroi et sa largeur est égale à la moitié de sa profondeur (Fig. 2-a).



**Figure 2:** Instabilité du fond de fouille par infiltration

Le facteur de sécurité correspondant à ce genre de rupture est:

$$i_c / i_m \quad (2)$$

Dans cette expression, proposée par Terzaghi et Peck et confirmée par McNamee [2], la valeur de  $i_m$  est le gradient moyen à la base du prisme. McNamee a étudié les différents modes d'instabilité des massifs liés à l'infiltration d'eau. Il a proposé des abaques permettant de déterminer le facteur de sécurité pour différentes dimensions d'excavation. Deux modes sont distingués :

- Soulèvement qui affecte un petit volume de sol au fond de fouille (Fig.2-b);
- Soulèvement qui entraîne un grand volume de sol (Fig.2-a).

McNamee affirme que le piping se produit lorsque le poids d'un petit prisme de sol à la surface d'excavation est insuffisant à résister à la force d'écoulement ascendant. Il a défini le facteur de sécurité dans ce cas par:

$$F = W / U \quad (3)$$

Avec :

W: est le poids déjaugé du prisme;

U: est la force d'écoulement ascendante.

Après quelques opérations, F devient:

$$F = i_c / i_x \quad (4)$$

Où  $i_x$  est le gradient de sortie .

Ce genre d'instabilité apparaît à la surface de sol (liquéfaction). Ce phénomène est désigné par la boulangerie par Terzaghi et Peck. Si  $i_x$

Marsland [3] a utilisé la même expression pour le soulèvement, mais le gradient  $i_x$  est la moyenne entre le gradient de sortie et le gradient au pied de la paroi. Néanmoins, Marsland est le seul qui a spécifié que ce phénomène apparaît uniquement pour le sable lâche.

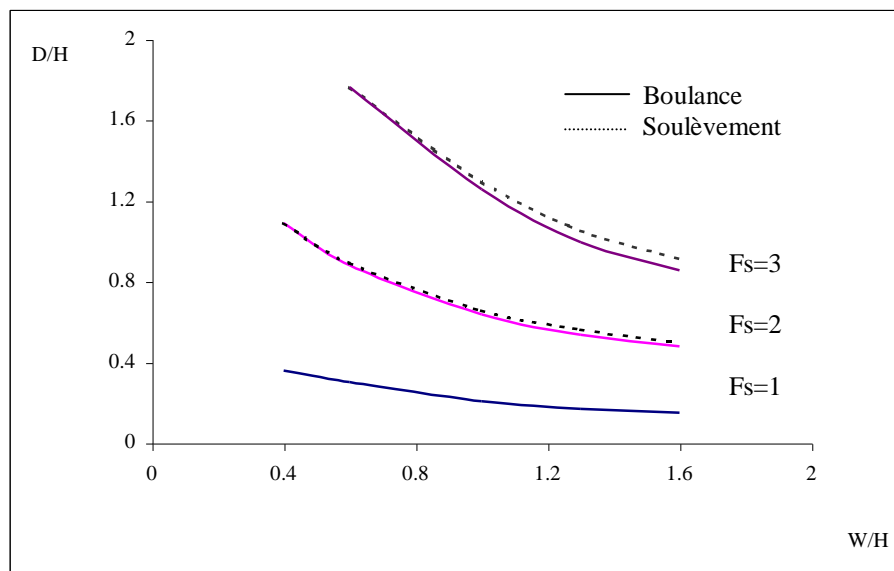
## 4- STABILITE DU FOND DE FOUILLE

Le coefficient de sécurité du fond de fouille est déterminé par la formule:

$$F = i_c/i_x \quad (5)$$

Où  $i_c = G_s - 1) \cdot (1 - n)$   
 $G_s$  : densité spécifique du sol  
 $N$  : porosité  
 $I_x$  : est le gradient de sortie pour la boullance  
 $I_x$  : est le gradient moyen à la base pour le soulèvement

Les coefficients de sécurité calculés en utilisant le logiciel FLAC (Itasca 1998)[4] sont présentés aussi bien pour la boullance que pour le soulèvement pour les valeurs de  $F_s=1, 2$  et  $3$  illustrés sur la figure 3.



**Figure 3** :Coefficient de sécurité en fonction de la géométrie de la fouille

Ces résultats (Fig. 3) montrent qu'une augmentation de la fiche entraîne une augmentation du coefficient de sécurité .Ce type d'abaque permet d'avoir une estimation rapide de l'ordre du coefficient de sécurité.

On ne peut différencier les courbes de boullance et de soulèvement pour un coefficient de sécurité  $F_s = 1$ . Par ailleurs, on remarque que la courbe concernant la boullance est plus basse que celle du soulèvement pour  $F_s > 1$ . Ce résultat est théoriquement justifié car le gradient de sortie est plus faible que celui à la base. Ce qui montre que le coefficient de sécurité pour la boullance est toujours supérieur à celui du soulèvement sous les mêmes conditions.

## 5- STABILITE DE LA PAROI

La pression active exercée par le sol sur la structure adjacente est donnée par la théorie de Rankine :

$$\sigma_a = K_a \cdot \gamma \cdot z \quad (6)$$

$\sigma_a$  : contrainte active des terres  
 $K_a$  : coefficient de poussée des terres ( $K_a = \text{tg}^{-2} \Phi$ )  
 $\gamma$  : poids du sol  
 $z$  : la profondeur

De la même manière, la pression passive est donnée par :

$$\sigma_p = K_p \cdot \gamma \cdot z \quad (7)$$

$K_p$  (coefficient de butée des terres) est tiré à partir des tables de Kerisel et Absi [5].

En tenant compte de l'écoulement, on obtient:

$$\text{Pression active des terres à la profondeur } z \quad \sigma_a = K_a \cdot (\gamma - \gamma_w i) \cdot z \quad (8)$$

$$\text{Pression passive des terres à la profondeur } z \quad \sigma_p = K_p \cdot (\gamma + \gamma_w i) \cdot z \quad (9)$$

$\gamma$  : poids du sol déjaugé).  $\gamma = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$   
 $\gamma_w$  : poids volumique de l'eau

$$\text{Pression de l'eau sur la face active: } W_a = z \cdot (1 - i) \cdot \gamma_w \quad (10)$$

$$\text{Pression de l'eau sur la face passive: } W_p = z \cdot (1 + i) \cdot \gamma_w \quad (11)$$

Le coefficient de sécurité de la paroi déterminée par la méthode CP2 est:

$$F_s = M_p / (M_a + M_{wa} - M_{wp}) \quad (12)$$

Où

$M_p$  : est la somme des moments due à la butée des terres;  
 $M_a$  : est la somme des moments due à la poussée des terres  
 $M_{wa}$  : est la somme des moments due à l'eau sur la face active  
 $M_{wp}$  : est la somme des moments due à l'eau sur la face passive

L'approche traditionnelle suppose que le gradient moyen est constant [6] :

$$i = H / (H + 2D) \quad (13)$$

L'approche basée sur les travaux de Soubra [7] et Kastner et Soubra [8] suppose que l'effet d'écoulement est uniquement dans la face passive. Ainsi le coefficient de butée est réduit. La pression sur face passive est déduite à partir du réseau d'écoulement. Soubra propose le long de la paroi sur la face passive une résultante de la pression de l'eau exprimée par :

$$U = \gamma_w \cdot D^2 / 2 + \gamma_w \cdot H \cdot D \cdot (1/2 - 1/\pi) \quad (14)$$

Avec :  $H$  la différence de charge totale;  
 $D$  la profondeur de la fiche.

La résultante de la force de pression passive est appliquée à la distance  $Y$  à partir du bas:

$$Y = D(D/6 + H(3/8 - 1/\pi)) / ((D/2 + H(1/2 - 1/\pi))) \quad (15)$$

Le coefficient réduit de butée des terres est tiré des abaques de Soubra [7].

La comparaison est faite sur un cas simple où  $H=2$  m,  $W=2$  m,  $D=4.2$  m, perméabilité  $k=4.10^{-2}$  m/s, porosité  $n=0.3$ , angle de frottement  $\Phi=32^\circ$ , cohésion  $c=0$ , angle de frottement sol-paroi  $\delta=16^\circ$ ,  $K_a=0.31$ ,  $K_p=5$  et  $\gamma_{sat}=20$  KN/m<sup>3</sup>.

L'approche traditionnelle  $i = H / (H+2D)=0.192$  donne un coefficient de sécurité  $F_s=1.532$   
L'approche de Soubra (1989), avec un  $K_p$  réduit à 4, donne un coefficient de sécurité  $F_s=1.316$ .

L'approche numérique permet de tenir compte de la variation réelle du gradient à chaque niveau considéré. Le gradient sur les deux faces de la paroi (tableaux 1 et 2) est tirée à partir d'une simulation de l'écoulement (fig. 4) à l'aide du logiciel FLAC en différences finies explicites spécialisé en géotechnique et en écoulement souterrains.

**Tableau n°1:** Calcul des actions actives sur la paroi

Gradient	Epaisseur de l'élément (m)	Profondeur (m)	Bras de levier (m)	$\sigma_a$ (KN/m <sup>2</sup> )	Moment de $\sigma_a$ (KN.m)	Pression d'eau $W_a$ (KN/m <sup>2</sup> )	Moment de $W_a$ (KN.m)
0.000	0.250	0.125	6.075	0.388	0.589	1.250	1.898
0.000	0.250	0.375	5.825	1.163	1.693	3.750	5.461
0.001	0.250	0.625	5.575	1.939	2.703	6.244	8.702
0.003	0.250	0.875	5.325	2.720	3.621	8.726	11.616
0.005	0.250	1.125	5.075	3.504	4.446	11.197	14.206
0.007	0.250	1.375	4.825	4.290	5.175	13.661	16.478
0.009	0.250	1.625	4.575	5.080	5.811	16.112	18.428
0.011	0.250	1.875	4.325	5.874	6.351	18.553	20.061
0.013	0.250	2.125	4.075	6.671	6.797	20.979	21.372
0.015	0.250	2.375	3.825	7.473	7.146	23.394	22.370
0.017	0.250	2.625	3.575	8.278	7.398	25.797	23.056
0.020	0.250	2.875	3.325	9.089	7.555	28.182	23.426
0.023	0.250	3.125	3.075	9.905	7.615	30.547	23.483
0.026	0.250	3.375	2.825	10.729	7.578	32.889	23.228
0.029	0.250	3.625	2.575	11.561	7.442	35.208	22.665
0.033	0.250	3.875	2.325	12.403	7.209	37.491	21.791
0.037	0.250	4.125	2.075	13.254	6.876	39.744	20.617
0.042	0.250	4.375	1.825	14.125	6.445	41.934	19.133
0.047	0.250	4.625	1.575	15.015	5.912	44.065	17.350
0.055	0.250	4.875	1.325	15.936	5.279	46.093	15.268
0.064	0.250	5.125	1.075	16.896	4.541	47.996	12.899
0.076	0.250	5.375	0.825	17.921	3.696	49.692	10.249
0.093	0.250	5.625	0.575	19.059	2.740	51.019	7.334
0.121	0.250	5.875	0.325	20.407	1.658	51.671	4.198
0.166	0.200	6.100	0.100	22.044	0.441	50.889	1.018
			Total 126.714			Total 386.310	

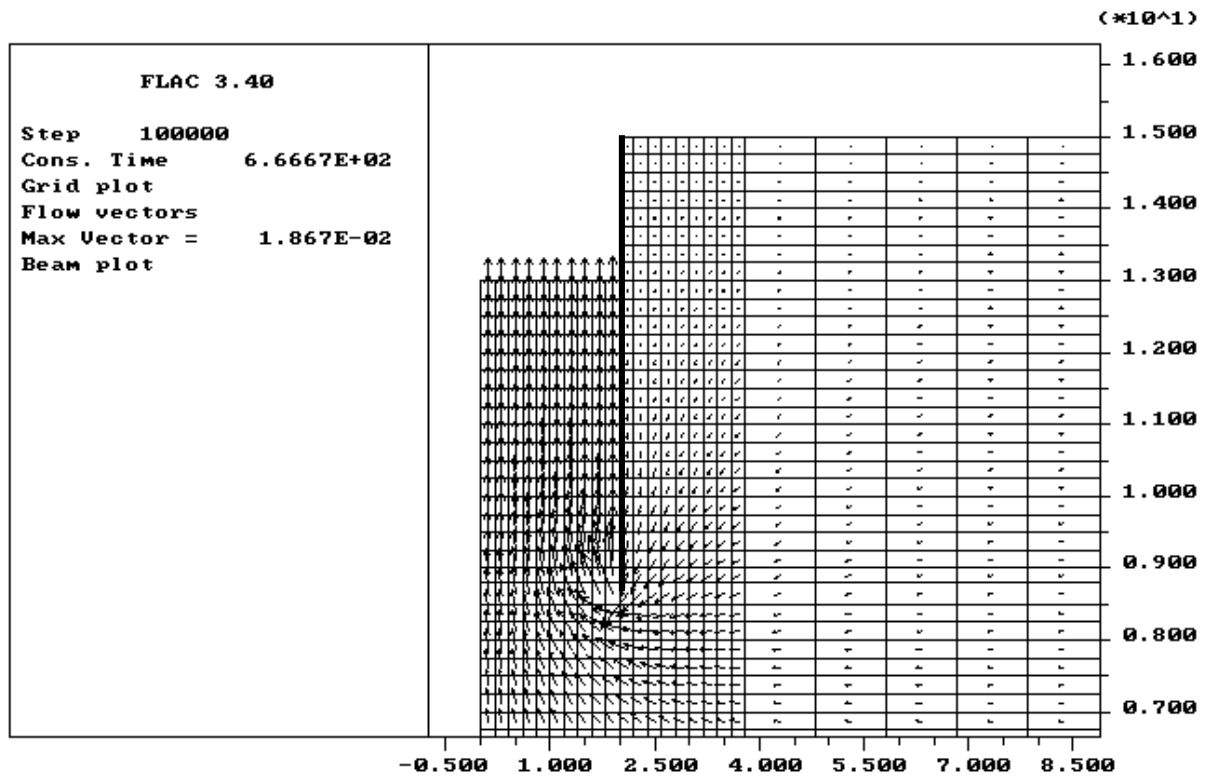
Le coefficient de sécurité est  $F_s = 1.297$

La comparaison des résultats obtenus montre l'influence de la variation non négligeable du gradient hydraulique.

**Tableau n°2: Calcul des actions passives sur la paroi**

Gradient	Epaisseur de l'élément (m)	Profondeur (m)	Bras de levier (m)	$\sigma_p$ (KN/m <sup>2</sup> )	Moment de $\sigma_p$ (KN.m)	Pression d'eau $W_p$ (KN/m <sup>2</sup> )	Moment de $W_p$ (KN.m)
0.241	0.250	0.125	4.075	4.744	4.833	1.551	1.580
0.241	0.250	0.375	3.825	14.231	13.609	4.654	4.450
0.241	0.250	0.625	3.575	23.719	21.199	7.756	6.932
0.241	0.250	0.875	3.325	33.206	27.603	10.859	9.026
0.241	0.250	1.125	3.075	42.680	32.810	13.964	10.735
0.242	0.250	1.375	2.825	52.147	36.829	17.071	12.056
0.242	0.250	1.625	2.575	61.588	39.647	20.183	12.992
0.243	0.250	1.875	2.325	71.016	41.278	23.297	13.541
0.243	0.250	2.125	2.075	80.405	41.710	26.419	13.705
0.245	0.250	2.375	1.825	89.716	40.933	29.557	13.485
0.247	0.250	2.625	1.575	98.897	38.941	32.721	12.884
0.249	0.250	2.875	1.325	107.920	35.749	35.916	11.897
0.254	0.250	3.125	1.075	116.602	31.337	39.180	10.530
0.261	0.250	3.375	0.825	124.748	25.729	42.550	8.776
0.273	0.250	3.625	0.575	131.814	18.948	46.137	6.632
0.295	0.250	3.875	0.325	136.691	11.106	50.162	4.076
0.335	0.200	4.100	0.100	136.428	2.729	54.715	1.094
					Total		Total
					464.987		154.393

Job Title :  
From File : z5.sav



**Figure 4: Simulation des vecteurs d'écoulement**

## 6- CONCLUSION

Une conclusion générale sur l'effet de l'écoulement sur la stabilité du fond de fouille ou de la paroi n'est pas possible car elle dépend de plusieurs facteurs (nature de la paroi, stratification, conditions de l'écoulement....), mais il est possible de conclure que les pressions en présence d'un écoulement sont déterminées par les équations précédentes. Ces relations dépendent principalement du gradient hydraulique déterminé par plusieurs méthodes. Le gradient peut avoir une distribution simple ou bien déterminer à différentes profondeurs par une méthode numérique ou un graphique de réseau d'écoulement. L'analyse des résultats montre que l'approche traditionnelle surestime le coefficient de sécurité alors que l'approche de Soubra et Kastner qui tient compte de la réduction du coefficient de la butée donne un résultat très proche et rapide.

## 7- REFERENCES

- [1] **Terzaghi K. and Peck R.B.** "Soil Mechanics in engineering practice". Wiley. New-York, 1948.
- [2] **McNamee J.** "Seepage into a sheeted excavation". Geotechnique 1, 229-241, 1948.
- [3] **Marsland A.** "Model experiments to study the influence of seepae on the stability of a sheeted excavation in sand". Geotechnique 3, 223-240, 1952.
- [4] **Itasca Consulting Group, Inc.** FLAC User Manual Version 3.4., Minneapolis, Minnesota, 1998.
- [5] **Kerisel J. et Absi E.** ."Tables de poussée et de butée des terres". Presses E. N. P. C. , 1990.
- [6] **Lang J.H.** "Grundsatzliche Einflusse des grundwassers auf die geotechnischen probleme". Schweizerische Bauzeitung 92 (18), 1-8, 1973.
- [7] **Soubra A.H.** "Application de la méthode variationnelle au problème de détermination des pressions passives des terres. Influence des forces d'écoulement". Thèse doctorale, INSA de Lyon, 1989.
- [8] **Soubra, A.H and Kastner R.** "Influence of seepage flow on the passive earth pressures". ICE, Proceedings of the conference on retaining structures 20-23 july 1992, Robinson College, Cambridge.