

Mise hors d'eau des excavations profondes Dewatering of deep excavations

Kastner Richard, INSA Lyon, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, France
Soubra Abdul Hamid, ENSAIS, 24 boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg, France
Bardot Francis, FONDA CONSEIL, 29 rue Roger Bréchan, 69003 Lyon, France
Chaussinand Alain, Lyon Parc Auto, 2 place des Cordeliers, 69002 Lyon, France
Archambault Christian, ARCHAMBAULT Conseil, 90 rue de Paris, 69890 La Tour de Salvagny, France

RESUME: Cet article traite des effets liés à la mise hors d'eau d'excavations profondes. Une approche théorique est proposée pour évaluer le risque de renard et la diminution de la butée liée à l'écoulement. Deux exemples de chantier, où les forces d'écoulement ont dû être prises en compte, sont présentés.

ABSTRACT: In this paper, a study of the influence of seepage forces during dewatering of deep excavations is presented. A theoretical approach of heaving and of passive pressure calculations in presence of seepage flow is proposed. Two case histories of excavations where seepage forces had to be considered are analysed.

1. INTRODUCTION

Les contraintes liées à l'aménagement des grandes agglomérations et la saturation de l'espace urbain conduisent à une occupation sans cesse croissante du sous-sol. On multiplie ainsi les excavations profondes pour la réalisation de parkings souterrains, de centres commerciaux installés en partie sous terre, de tunnels routiers ou de métro construits suivant la technique de la tranchée couverte. Les excavations pénètrent parfois profondément dans la nappe phréatique au sein d'aquifères de forte perméabilité nécessitant la mise en place de dispositifs de pompage provisoire ou définitif afin d'assurer la mise hors d'eau. Pour l'évaluation des débits d'exhaure, on dispose d'une palette de méthodes approchées, d'abaques ainsi que d'outils de simulation théorique assez précis. Ainsi, la qualité de la prévision du débit dépend essentiellement de la qualité de la reconnaissance géotechnique et notamment de l'estimation des perméabilités horizontales et verticales moyennes à l'échelle de l'ouvrage. Par contre, et notamment pour les fouilles pénétrant profondément dans l'aquifère, il convient de considérer également l'effet mécanique de l'écoulement induit par l'exhaure sur les poussées et butées ainsi que sur la stabilité du fond de fouille.

Ces divers effets sont souvent soit méconnus par les projeteurs, soit négligés, soit pris en compte de manière très approximative. Les phénomènes de réduction de la pression passive et du soulèvement en masse d'un prisme de sol devant la fiche sont en fait étroitement liés. Après avoir rappelé les principales méthodes de prévision existantes, on présente une approche globale développée suivant la méthode du prisme de rupture couplée à une approche variationnelle.

Deux exemples de chantiers lyonnais où l'exhaure était une source potentielle de désordres mécaniques sont ensuite présentés et analysés.

2. INCIDENCE MECANIQUE DE L'EXHAURE

Les rabattements de nappe à l'abri d'un écran étanche induisent un écoulement sensiblement vertical ascendant devant la fiche. Les forces d'écoulement liées à ce flux ascendant diminuent le poids apparent du sol : il s'ensuit une réduction de la pression passive disponible devant la fiche. A la limite, ces forces peuvent provoquer des désordres couramment désignés sous le terme de renard. En fait, ce terme peut recouvrir deux phénomènes distincts : la boulance et le soulèvement généralisé (Kastner, 1982).

La boulance est un phénomène de surface qui survient lorsque le gradient hydraulique vertical y atteint sa valeur critique. Ce phénomène est souvent localisé en raison des hétérogénéités en perméabilité. Se développant progressivement, il peut être combattu par diminution du pompage ou mise en place d'une surcharge filtrante.

Le soulèvement généralisé est plus brutal, concernant dans sa masse un prisme de sol devant la fiche, et susceptible de mettre en cause la stabilité de l'écran de soutènement.

2.1 Prévision du risque de renard.

Terzaghi (1943) a introduit la notion de gradient critique $i_c = \gamma' / \gamma_w$ conduisant, pour un écoulement unidirectionnel vertical, au soulèvement du sol, le poids des grains étant compensé par les forces dues à l'écoulement.

La boulance, phénomène de surface, éventuellement localisé, survient si, en un point du fond de fouille, le gradient hydraulique atteint sa valeur critique.

Cependant, les expériences de Marsland (1953) et Kastner (1982) ont montré qu'il pouvait y avoir soulèvement en bloc d'un prisme de sol devant la fiche, avant qu'il y ait boulance en surface. Divers auteurs ont examiné ce problème : Terzaghi (1943) propose de considérer l'équilibre d'un prisme EFIJ de largeur égale à $f/2$ et de hauteur variable (figure 1). Tout en négligeant les forces de cisaillement, il considère l'équilibre du prisme soumis sur sa base à une distribution de pression interstitielle de résultante U . Faisant ensuite varier la hauteur du prisme, il retient le plus défavorable.

Davidenkoff (1954) propose simplement de comparer le gradient moyen i_M calculé sur la hauteur de la fiche au gradient critique.

Mandel (1951) traite ce problème comme un problème de force portante de fondation : après avoir calculé les contraintes effectives externe et interne au pied de l'écran, il considère le sol externe comme une charge de fondation. Cette approche qui néglige les contraintes de cisaillement sur les faces verticales des prismes en rupture, tant pour le sol externe que pour le sol interne apparaît parfois bien trop pessimiste.

Enfin Bazant (1963) prend en compte les frottements en considérant un prisme de rupture circulaire se développant à partir du pied de l'écran sous l'effet des forces d'écoulement.

La comparaison de ces différentes approches dans le cas d'un écran fiché dans un milieu semi infini fait apparaître des écarts importants pouvant atteindre 75% (Kastner, 1982).

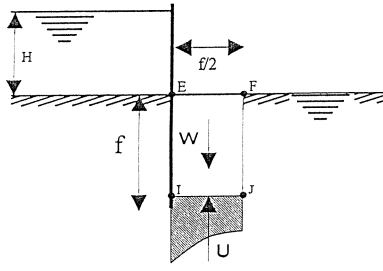


Figure 1. Schéma de rupture de Terzaghi.

2.2 Prise en compte du risque de renard et de la diminution de la pression passive

Les différentes méthodes proposées dans la littérature reposent sur des hypothèses assez restrictives, notamment pour le choix du mécanisme de rupture et la prise en compte de la résistance au cisaillement du sol. Par ailleurs, ces méthodes ne prennent en compte que le rôle de coupure étanche des écrans, alors que ceux-ci ont fréquemment un rôle simultané d'écran étanche et de soutènement. Dans ces conditions, la fiche est en appui sur le sol en fond de fouille et mobilise partiellement sa résistance pour assurer l'équilibre global du rideau de soutènement.

Enfin, les expériences de Marsland confirmées par celles de Kastner ont fait apparaître des prismes de rupture délimités par une courbe passant par le pied de l'écran, et non un prisme de rupture rectangulaire.

Ces observations nous ont amené à proposer un modèle de calcul de la butée qui peut être mobilisée devant un rideau de palplanches en présence d'un écoulement souterrain. L'approche adoptée est la méthode variationnelle appliquée à la méthode du prisme de rupture. Cette méthode présente l'avantage de ne pas faire d'hypothèses a priori concernant la forme de la ligne de glissement $y(x)$ et la distribution des contraintes normales $\sigma_e(x)$ le long de cette ligne. Ainsi, cette méthode permet de déterminer les fonctions $y(x)$ et $\sigma_e(x)$ donnant la plus faible valeur de la force de butée et pour lesquelles les trois équations de l'équilibre statique de la masse en glissement sont satisfaites.

2.2.1 Approche variationnelle de la méthode du prisme de rupture

Cette approche variationnelle a été introduite dans l'analyse des problèmes de stabilité en géotechnique par Baker & Garber (1978). Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à d'autres publications (Soubra, 1989).

L'écriture des trois équations de l'équilibre statique global de la masse de sol (figure 2) et l'introduction du critère de rupture de Mohr-Coulomb le long de la ligne de glissement permettent de donner les trois équations limites de la masse en glissement comme suit :

$$P_p \cos \delta + U_1 = \int_{x_0}^{x_1} [\sigma_e (\tan \phi + y') + u y'] dx$$

$$P_p \sin \delta = \int_{x_0}^{x_1} [\sigma_e (1 - \tan \phi \cdot y') + u - \gamma_{sat} (f - y)] dx$$

$$P_p \cos \delta \cdot f / 3 + U_1 X_2 =$$

$$\int_{x_0}^{x_1} [\sigma_e (1 - \tan \phi \cdot y') x - \gamma_{sat} (f - y) + u x + \sigma_e (\tan \phi + y') y + u y y'] dx$$

où $u(x)$ et $\sigma_e(x)$ représentent la distribution des pressions interstitielles et des contraintes effectives le long de la surface de glissement et U_1 représente la résultante des pressions interstitielles le long de la fiche. Tous les autres paramètres de ces équations sont définis sur les figures 1 et 2.

On peut démontrer (Soubra 1989) que le problème de la butée des terres par une approche variationnelle est un problème

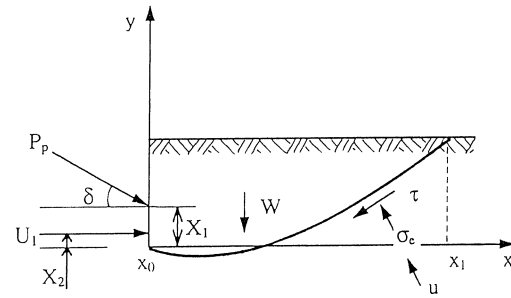


Figure 2. Prisme de rupture en butée.

variationnel de type isopérimétrique :

$$\text{Min} P_p = \int_{x_0}^{x_1} F(x, y, y', \sigma_e) dx$$

soumis à

$$\int_{x_0}^{x_1} G_i(x, y, y', \sigma_e) dx = a_i$$

où $F(x, y, y', \sigma_e)$, $G_i(x, y, y', \sigma_e)$ et a_i sont facilement obtenues à partir des équations précédentes. La solution de ce type de problème est obtenue en utilisant les équations d'Euler. La résolution de ces équations donne l'équation de la ligne de glissement. Il s'agit d'une spirale logarithmique d'angle ϕ . Les forces agissant sur la masse en glissement sont (i) son poids saturé W , (ii) la force de butée P_p , (iii) la distribution des pressions interstitielles sur le contour du prisme de rupture et finalement, (iv) la distribution des contraintes normales et tangentielles le long de la ligne de glissement. L'écriture de l'équation d'équilibre des moments par rapport au centre de la spirale donne l'expression de la force de butée P_p . On recherche ensuite la spirale qui donne la valeur minimale de la force de butée.

Il est à noter par ailleurs que ce prisme de rupture représente également un mécanisme de rupture rotationnel licite aux sens de l'analyse limite. Le résultat obtenu correspond donc à une borne supérieure en analyse limite.

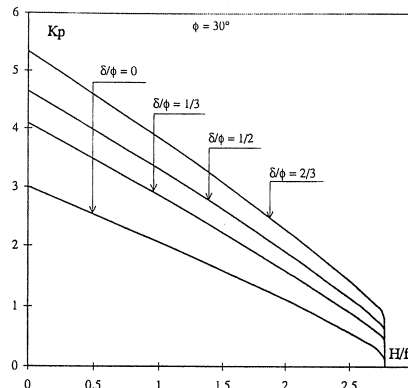


Figure 3. Coefficient de butée en présence d'écoulement.

2.2.2 Résultats numériques

Afin d'évaluer la validité de ce schéma de calcul, nous l'avons d'abord testé dans le cas de la pression passive en l'absence d'écoulement. Comparé aux valeurs données par Kérisel et Absi (1990) habituellement utilisées en France, ce schéma conduit à des résultats très voisins. Confrontées aux approches du type analyse limite par la borne supérieure, les valeurs obtenues sont toujours inférieures aux meilleurs résultats publiés (Chen 1975).

En présence d'écoulement, nous avons considéré le cas d'un rideau de palplanches fiché dans un sol homogène, isotrope et semi-infini.

La figure 3 présente à titre d'exemple la variation du coefficient de butée en présence d'écoulement K_{pe} ($K_{pe} = 2P_p / \gamma' f^2$) en fonction de H/f pour un angle de frottement donné ($\phi=30^\circ$), pour quatre valeurs de δ/ϕ quand $\gamma_{sat}/\gamma_w=2$. On note la décroissance logique de la butée disponible avec la perte de charge relative. Pour une butée nulle, il s'agit du soulèvement en masse tel qu'il était envisagé traditionnellement. La valeur obtenue ($H/f=2,78$) est à comparer aux valeurs correspondant à la boullance en surface ($H/f=3,14$) et à celle donnée par le schéma de Terzaghi ($H/f=2,82$) qui sous-estime légèrement la résistance du sol au soulèvement.

On trouvera d'autres résultats sous forme d'abaques dans Soubra (1992).

3. EXCAVATION DU PARC DE STATIONNEMENT « GARE PART-DIEU »

Situé devant la gare de la Part Dieu à Lyon, ce parking comporte 5 niveaux de sous-sol, sur une superficie en plan de 8 500 m².

La coupe géotechnique du site est la suivante: au dessus du substratum molassique, on trouve un important horizon d'alluvions sablo-graveleuses, recouvert de quelques mètres de remblais récents, le toit de la nappe phréatique étant situé à quelques mètres sous le terrain naturel (figure 4). L'horizon alluvial présente une très forte perméabilité horizontale, de l'ordre de 10^{-2} m/s, interdisant tout rabattement par simple pompage. La perméabilité du substratum molassique a été estimée par rétro analyse de l'exhaure de fouilles construites dans ces mêmes horizons : les perméabilités horizontales et verticales ainsi estimées sont respectivement de l'ordre de 6.10^{-5} m/s et 2.10^{-5} m/s.

Le fond de fouille de l'ouvrage pénètre de 1 à 3 mètres au sein du substratum molassique. L'ensemble des travaux a été effectué à l'abri d'une paroi moulée jouant simultanément le rôle d'écran étanche et de soutènement. Les terrassements ont été effectués en taupes, chacun des planchers réalisés à l'avancement servant de butonnage. Dans ces conditions d'étalement de la paroi, la fiche est essentiellement déterminée à partir des conditions hydrauliques.

3.1 Conception du système d'exhaure

Le parking étant complètement enterré, sa stabilité à long terme suppose soit la mise en place d'un radier ancré susceptible de résister aux sous pressions, soit la réalisation d'un radier drainant, avec pompage permanent. Comparée d'un point de vue économique à la dernière solution, la première présente un temps de retour de l'investissement estimé de 1 à 3 siècles. Dans ces conditions c'est la solution du radier drainant éliminant les sous-pressions qui a été retenue.

La conception du système d'exhaure résulte d'un compromis entre le coût de l'écran étanche, le débit d'exhaure et le risque de

désordres lié à l'écoulement. La fiche de l'écran étanche dans le substratum molassique est l'un des éléments déterminants du système. L'allongement de la fiche permet simultanément de réduire le débit d'exhaure ainsi que le risque de renard. Compte tenu des hétérogénéités et des désordres constatés sur un chantier similaire (boullance localisée), c'est la règle sécuritaire simple de Davidenkoff qui a été retenue comme critère de sécurité vis à vis du risque de renard.

Une première étude a été réalisée afin d'estimer l'incidence de la longueur de la fiche sur le coefficient de sécurité suivant le critère du gradient moyen proposé par Davidenkoff. Ce coefficient de sécurité a été défini ici comme étant le rapport $F=i_c/i_M$

où i_c est le gradient hydraulique critique

i_M le gradient hydraulique calculé entre le pied de l'écran étanche et le fond de fouille.

Pour cette fouille, il a été admis de rechercher un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,2, pour les raisons suivantes :

- l'aquifère constitue ainsi une réserve d'eau quasi inépuisable à l'échelle de ces travaux et ne sera pas rabattu par l'exhaure.

- l'anisotropie et l'hétérogénéité de l'horizon molassique sont difficiles à évaluer précisément alors que ces deux facteurs ont une forte influence sur le gradient hydraulique en fond de fouille.

- des difficultés de terrassement et de mise en boullance localisées sont apparues sur un chantier similaire.

Ces calculs préliminaires montrent que, dans l'hypothèse d'un rapport d'anisotropie égal à 3, il faut une fiche minimale de 12 mètres pour atteindre un facteur de sécurité égal à 1,2. Pour des raisons d'économie et de sécurité, une solution alternative a été examinée, consistant à réduire la fiche tout en mettant en place un réseau de puits de pompage permettant de limiter les sous-pressions en fond de fouille.

Une première étude, avec un réseau de puits pénétrant de 8 mètres sous le fond de fouille et disposés suivant un maillage de 7 mètres conduit, pour une fiche réduite à 10 mètres, à un coefficient de sécurité supérieur à 1,4 vis à vis du gradient moyen, les gradients verticaux en fond de fouille étant quasi nuls. En revanche, ce dispositif conduit à une augmentation du débit d'exhaure de 50 à 66 %. Finalement, le rabattement a été assuré par 85 puits, non compris quelques puits complémentaires nécessaires au droit des fosses. En phase définitive, ce dispositif constitue un réseau de drains passifs alimentant le radier drainant placé en fond de fouille.

3.2 Bilan des observations

Afin de suivre l'évolution des gradients hydrauliques avec la progression de l'exhaure, un dispositif composé de piézomètres et de sondes de pression interstitielle a été mis en place en divers points de la fouille et à différents niveaux.

La première phase de rabattement a été effectuée par simple pompage dans les alluvions sablo-graveleuses, jusqu'au niveau de la plate-forme intermédiaire utilisée pour réaliser le forage du réseau de puits drainants.

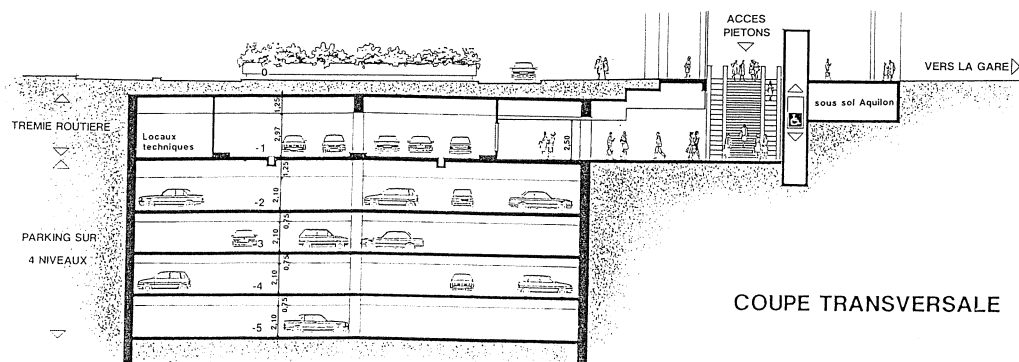


Figure 4. Coupe du parc de stationnement « Gare Part-Dieu ».

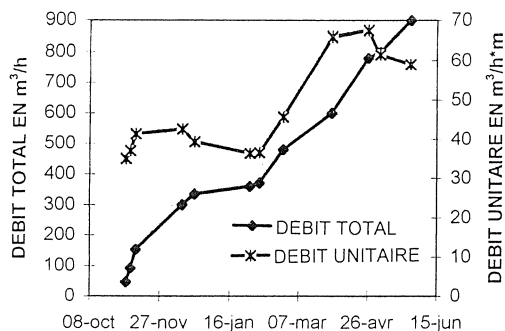


Figure 5. Evolution du débit avec le rabattement

La figure 5 présente l'évolution du débit total ainsi que celle du débit unitaire avec le temps. Celui-ci de l'ordre de 38 m³/h et par mètre de rabattement lors de la première phase monte à plus de 60 m³/h et par mètre de rabattement après la mise en service du réseau de puits, le débit total ayant atteint 900 m³/h. Les valeurs ainsi obtenues confirment les estimations effectuées lors du projet.

3.2.1 Sécurité vis à vis du gradient moyen

Pour chacune des deux phases, ce gradient est proportionnel à la valeur du rabattement, soit $i_M = \alpha \Delta H$.

En bordure de l'écran étanche les valeurs de α obtenues lors de la phase initiale sont assez élevées, de l'ordre de 7 à 8.10⁻² m⁻¹. Pour le rabattement final, ces valeurs conduiraient à un gradient moyen allant de 1,2 à 1,3 confirmant ainsi la nécessité du dispositif de drainage en fond de fouille.

Après la réalisation du dispositif de drainage en fond de fouille par puits filtrants, la valeur de α en périphérie se stabilise entre 0,5 et 0,6 m⁻¹ correspondant à un gradient moyen de 0,8 à 0,95 (0,2 à 0,3 au centre de la fouille). Ainsi, le dispositif de drainage du fond de fouille apparaît globalement efficace pour réduire le gradient moyen.

3.2.2 Sécurité vis à vis de la boullance

Le gradient en fond de fouille est l'indicateur du risque de boullance. En phase initiale, les mesures piezométriques permettant d'évaluer le gradient en fond de fouille conduisent, pour le rabattement maximal prévu, à des valeurs extrapolées comprises entre 0,8 et 0,95. Compte tenu des dispersions observées, ces valeurs sont trop proches du gradient critique et sont donc inadmissibles.

Après mise en place des puits drainants, ces gradients hydrauliques chutent fortement, ne dépassant pas la valeur de 0,4 indiquant ainsi un niveau de sécurité acceptable.

4. METRO DE LYON - EXCAVATION EN TRANCHEE COUVERTE

Cette excavation concerne une tranchée couverte au sein d'un horizon de limons plus ou moins sableux ou argileux de caractéristiques mécaniques médiocres. La fouille, de 8 m de profondeur pénètre de 2 à 3 mètres dans la nappe phréatique (la valeur de calcul pour le projet étant de 3,65 m). Elle est protégée par deux rideaux en paroi moulée maintenus en tête par deux niveaux de butons.

L'étude de la stabilité du fond de fouille suivant les approches de Terzaghi et de Davidenkoff a conduit à une valeur de la fiche égale à 2,5 m. Avec cette fiche, la mise hors d'eau s'est déroulée sans problèmes de stabilité du fond de fouille, la sécurité vis à vis du gradient moyen étant égale à 1,6.

Par ailleurs, le chantier a fait également l'objet d'une auscultation du comportement mécanique de la paroi moulée butonnée. Une rétro analyse effectuée sur l'ensemble de ces résultats expérimentaux (Kastner et Ferrand, 1992) a mis en

évidence, lors de la phase finale, une diminution de l'ordre de 40 % de la butée disponible devant la fiche. Cette réduction de la pression passive peut être attribuée à l'incidence de l'écoulement en fond de fouille et est du même ordre de grandeur que celle donnée par notre approche théorique.

5. CONCLUSIONS

Les observations effectuées sur deux chantiers de la région lyonnaise ont mis en évidence l'incidence des forces d'écoulement sur la stabilité du fond de fouille, lors de la mise hors d'eau des excavations. Avec le développement d'excavations pénétrant profondément sous le niveau de la nappe, ces forces, souvent ignorées ou mal prises en compte, peuvent avoir des conséquences importantes sur le déroulement du chantier.

Les règles approchées, développées pour des conditions aux limites simples peuvent conduire à une estimation erronée du risque de renard. Une évaluation plus précise nécessite, dans un premier temps, une étude complète de l'écoulement induit par l'exhaure, en tenant compte des conditions de sol et des conditions aux limites réelles (alimentation de la nappe, largeur limitée de l'excavation, anisotropie et hétérogénéité en perméabilité).

Par ailleurs, le chantier du métro à Gorges de Loup a montré que l'écoulement vertical ascendant coté fouille peut induire une réduction non négligeable de la pression passive disponible devant la fiche, lorsque l'écran a un rôle simultané d'étanchéité et de soutènement. Une approche théorique a été proposée ici, traduite sous forme d'abaques donnant les coefficients de butée, en présence d'écoulement.

Enfin, dans le cas de fouilles profondes, un suivi des pressions interstitielles permettra d'évaluer l'évolution des gradients hydrauliques avec la progression du rabattement. Ces observations, effectuées en temps réel, permettent de vérifier la pertinence des choix de conception et de les faire évoluer.

REFERENCES

- Baker, R., Garber, M. 1978. Theoretical analysis of the stability of slopes. *Geotechnique* v.28, n°2, p.1-17.
- Bazant, Z. 1963. Ergebnisse der berechnung der stabilitat gegen hydraulischen Grundbruch mit hilfe der Elektronen-rechen anlage. *Proc. Int. Conf. On Soil Mech. And Found. Engineering*, 24-27, pp.215-224, Budapest.
- Chen, W.F. 1975. Limit analysis and soil plasticity. 637p. Amsterdam : Elsevier.
- Davidenkoff, R.N. 1954. Zur berechnung des hydraulischen grundbruchs. *Wasserwirtschaft*, n°46, pp.230-235.
- Kastner, R. 1982. Excavations profondes en site urbain : problèmes liés à la mise hors d'eau. Dimensionnement des soutènements butonnés. *Thèse de Docteur ès Sciences*, 409 pp, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon I.
- Kastner, R., Ferrand, J. 1992. Performance of a cast in situ retaining walls in a sandy silt. *Proc. International Conference on Retaining Structures, ICE*, Cambridge.
- Kerisel, J., Absi, E. 1990. Tables de poussée et butée des terres. *Presse des Ponts et Chaussées*, Paris.
- Mandel, J. 1951. Ecoulement de l'eau sous une ligne de palplanches - Abaques pour la condition de renard. *Travaux*, n°197, pp.273-281.
- Marsland, A. 1953. Model experiment to study the influence of seepage on the stability of a sheeted excavation in sand. *Geotechnique*, vol.3, 223-241.
- Soubra, A.H. 1989. Application de la méthode variationnelle au problème de détermination des pressions passives des terres. Influence des forces d'écoulement. *Thèse de Doctorat*, 200 pp, INSA Lyon.
- Soubra, A.H., Kastner, R., 1992. Influence of the seepage forces on the passive earth pressures. *Proc. International Conference on Retaining Structures, ICE*, Cambridge.
- Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics, 510 pp, Wiley, New-York.