

Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement

I. L'approche par le calcul – les méthodes classiques et la méthode au coefficient de réaction

Luc DELATTRE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

La technologie des écrans de soutènement est apparue sous sa forme moderne il y a environ un siècle et à la même époque ont été entrepris les développements nécessaires à la mise au point des méthodes de justification du dimensionnement des ouvrages, efforts qui se sont poursuivis tout au long du XX^e siècle.

L'article rappelle, dans un premier temps, l'état des connaissances au début du XX^e siècle en matière de calcul d'ouvrages de soutènement et présente les questions nouvelles alors posées par le dimensionnement des écrans de soutènement. Partant de ces questions nouvelles, il présente les différents travaux menés et les méthodes de calcul des ouvrages qui en résultent, le champ de l'article étant restreint aux approches théoriques simplifiées qui ont précédé le développement de la méthode des éléments finis*.

Ces travaux ont conduit au développement des méthodes classiques et de la méthode du coefficient de réaction. Ils ont permis d'abord de compléter les théories existantes de la poussée des terres pour traiter de la butée mobilisée devant la partie en fiche des écrans de soutènement. Ils ont porté ensuite sur la modélisation des conditions d'appui en fiche, depuis les méthodes assimilant l'ouvrage à une structure infiniment rigide jusqu'aux méthodes de rideau encastré. Ils ont enfin porté sur l'application du concept de coefficient de réaction au calcul des écrans de soutènement. La mise en œuvre de la méthode du coefficient de réaction a visé l'interaction du sol avec l'écran pour la partie en fiche, tout d'abord, pour modéliser les conditions d'encastrement de l'écran dans le sol, avant d'être généralisée à l'ensemble de l'interaction sol-écran.

L'article conclut sur les limites de ces méthodes simplifiées. Certaines formes d'interaction sol-écran de soutènement, comme la poussée des terres sur un écran souple et butonné, mais aussi d'une façon plus générale les déformations de l'ouvrage et du sol, leur restent inaccessibles.

DOMAINE : Géotechnique et risques naturels.

ABSTRACT

Retaining wall technology began to take its modern form about a century ago. This gave the start of essential work to develop design validation methods for structures, which continued throughout the XXth century.

The paper starts with a brief survey of the state of the art with regard to the design of retaining structures as it stood at the beginning of the XXth century and describes the new retaining wall design problems that were encountered at that time. It describes the research that was stimulated by these problems and the resulting design methods for structures. The scope of the paper has been restricted to the simplified theoretical approaches which preceded the development of the finite element method ().*

This work led to the development of conventional methods and the modulus of subgrade reaction method. Research began by extending existing theories of earth pressure to include the passive pressure mobilized in front of the embedded part of retaining walls. It next dealt with the behaviour of the embedment and ranged from methods which consider the structure as being perfectly rigid to free earth support methods. Lastly, research applied the subgrade reaction concept to the design of retaining walls. Initially, implementation of the modulus of subgrade reaction method related to the interaction of the embedded part of the wall with the soil, in order to model the relative fixity of the wall in the soil, before it was generalized to deal with the entire soil-wall interaction.

The paper ends with a discussion of the limits of these simplified methods. They remain unsuitable for some types of soil/retaining wall interaction, such as earth pressure on a flexible braced wall, but also more generally for predicting deformations of the structure and the soil.

* Le présent article est appelé à être complété par deux articles portant respectivement sur l'approche empirique qui s'est développée à partir des années 1940 et sur l'application à partir des années 1970 de la méthode des éléments finis aux écrans de soutènement.

Introduction

Les méthodes de calcul des écrans de soutènement en usage aujourd'hui sont très diverses. Coexistent ainsi dans les documents techniques, depuis les manuels scolaires jusqu'aux documents mis à la disposition des ingénieurs, des méthodes nées au début du siècle et des méthodes développées à partir des années 1970, des méthodes complètement empiriques et des méthodes reposant uniquement sur des modèles théoriques, des méthodes prétendant rendre compte du comportement en service des ouvrages, tout en étant qualifiées de méthodes « à la rupture », et des méthodes rendant effectivement compte du comportement à la rupture des ouvrages, bien qu'en faible nombre pour ces dernières.

Cette situation n'est pas pour autant désordonnée. Elle est simplement le fruit de tentatives répétées d'aborder une des formes d'ouvrage les plus complexes de la géotechnique, pour laquelle, non seulement les appuis de la structure sont constitués par le sol, à l'instar des fondations, mais également dont le chargement est apporté par le sol.

Après un rappel de l'état des connaissances qui prévalait au début du XX^e siècle, l'article décrit, en s'appuyant sur la bibliographie, cette évolution des méthodes de calcul, en s'attachant à préciser les réponses apportées par chaque génération de méthode au problème général des écrans de soutènement et en resituant, chaque fois que nécessaire, le problème dans le contexte technique de l'époque.

Cette description est présentée en trois parties. La première partie, objet du présent article, traite des approches théoriques du calcul des écrans de soutènement, approches dominantes en France depuis le début du XX^e siècle et jusqu'à aujourd'hui, et des méthodes de calcul qui en sont le fruit, méthodes dites « classiques » et méthode du coefficient de réaction. Une deuxième partie est consacrée à l'approche empirique du dimensionnement des écrans de soutènement, approche qui s'est développée essentiellement dans les pays anglo-saxons à partir des années 1930. Enfin, une troisième partie a pour objet l'apport de la méthode des éléments finis, à partir des années 1970, pour le calcul des écrans de soutènement.

La question du dimensionnement des écrans de soutènement

Dans le domaine des ouvrages de soutènement, la domination des murs-poids en maçonnerie jusqu'au début du XX^e siècle a conduit à concentrer, depuis les prédécesseurs de Coulomb jusqu'à Boussinesq, les travaux de recherche sur la poussée des terres exercée sur ce type d'ouvrages (Delattre, 1999). Sur ce sujet, la réussite des ingénieurs des XVIII^e et XIX^e siècles est incontestable puisque ce sont encore leurs travaux qui sont à la base du dimensionnement des ouvrages en France comme à travers le monde.

Les réponses apportées à l'époque (méthode de Coulomb et théories de Rankine et de Boussinesq, en particulier) permettent en effet de traiter ce problème de façon satisfaisante : les murs-poids, ouvrages rigides, présentent en général une cinématique qui consiste principalement en un déversement de l'ouvrage, sous l'action de la poussée du terrain soutenu, ce dernier se trouvant ainsi décomprimé latéralement et amené dans un état d'équilibre limite de poussée (fig. 1).

Le développement, au début du siècle, des écrans de soutènement (Delattre, 2000), ouvrages souples prenant appui dans le terrain et présentant une déformation propre, va élargir considérablement la question de l'interaction sol-structure. À la question de la poussée des terres

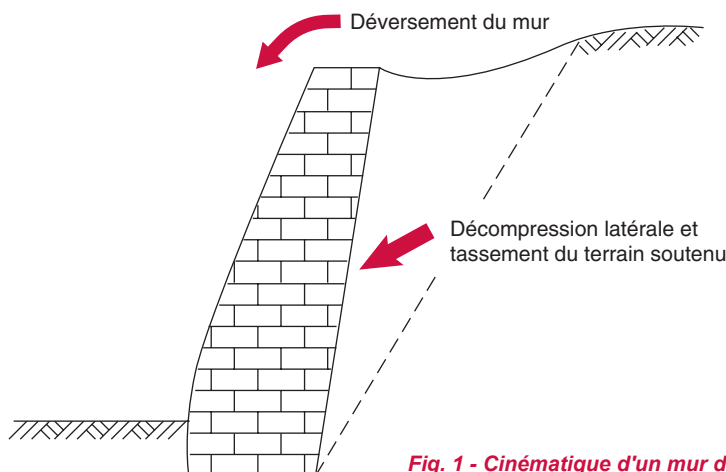


Fig. 1 - Cinématique d'un mur de soutènement et du terrain soutenu.

s'ajoute maintenant la question de la butée des terres, compte tenu de l'appui opposé par le sol à la partie en fiche de l'ouvrage. À la cinématique de rotation en pied qui prévaut pour les ouvrages de soutènement des remblais s'ajoutent des cinématiques de rotation en tête, pour des soutènement d'excavation. Des formes d'interaction nouvelles avec les écrans de soutènement souples s'ajoutent enfin aux interactions connues avec les murs-poids rigides (fig. 2).

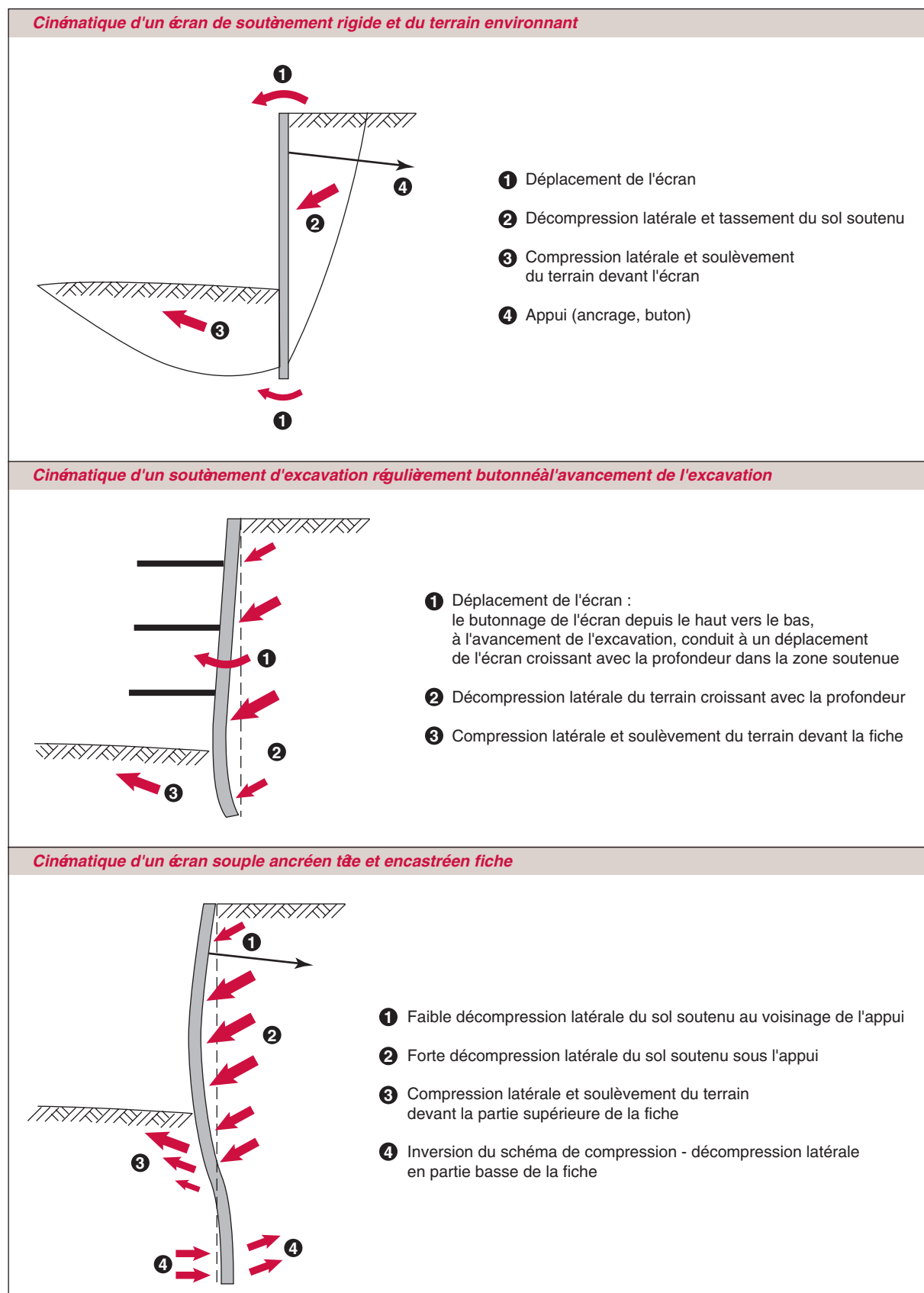


Fig. 2 - Schémas d'interaction sol-écrans de soutènement.

L'identification successive de ces nouveaux aspects de l'interaction sol-écran de soutènement et les tentatives d'y apporter des réponses, ces dernières tenant par ailleurs compte des outils généraux alors disponibles, constituent autant d'étapes du développement des méthodes de calcul des écrans de soutènement. Les directions prises par ces développements sont au nombre de quatre (fig. 3) :

- la voie empruntée semble-t-il de prime abord se situe dans la lignée des travaux menés à partir du XVIII^e siècle dans le domaine des murs de soutènement. Les travaux réalisés font largement appel aux théories de poussée développées antérieurement, ainsi qu'à la statique et aux méthodes de la résistance des matériaux. Elles ont permis le développement des méthodes dites « classiques » ;
- à cette première approche s'adjoint assez vite l'approche fondée sur la notion de module, ou coefficient, de réaction dont les bases ont été définies à la fin du XIX^e siècle. Cette approche reste toutefois peu développée pendant toute la première moitié du XX^e siècle car elle nécessite des moyens d'intégration qui ne seront réellement mis à la disposition de l'ingénieur qu'avec l'apparition du calcul informatique, dans les années 1960 ;

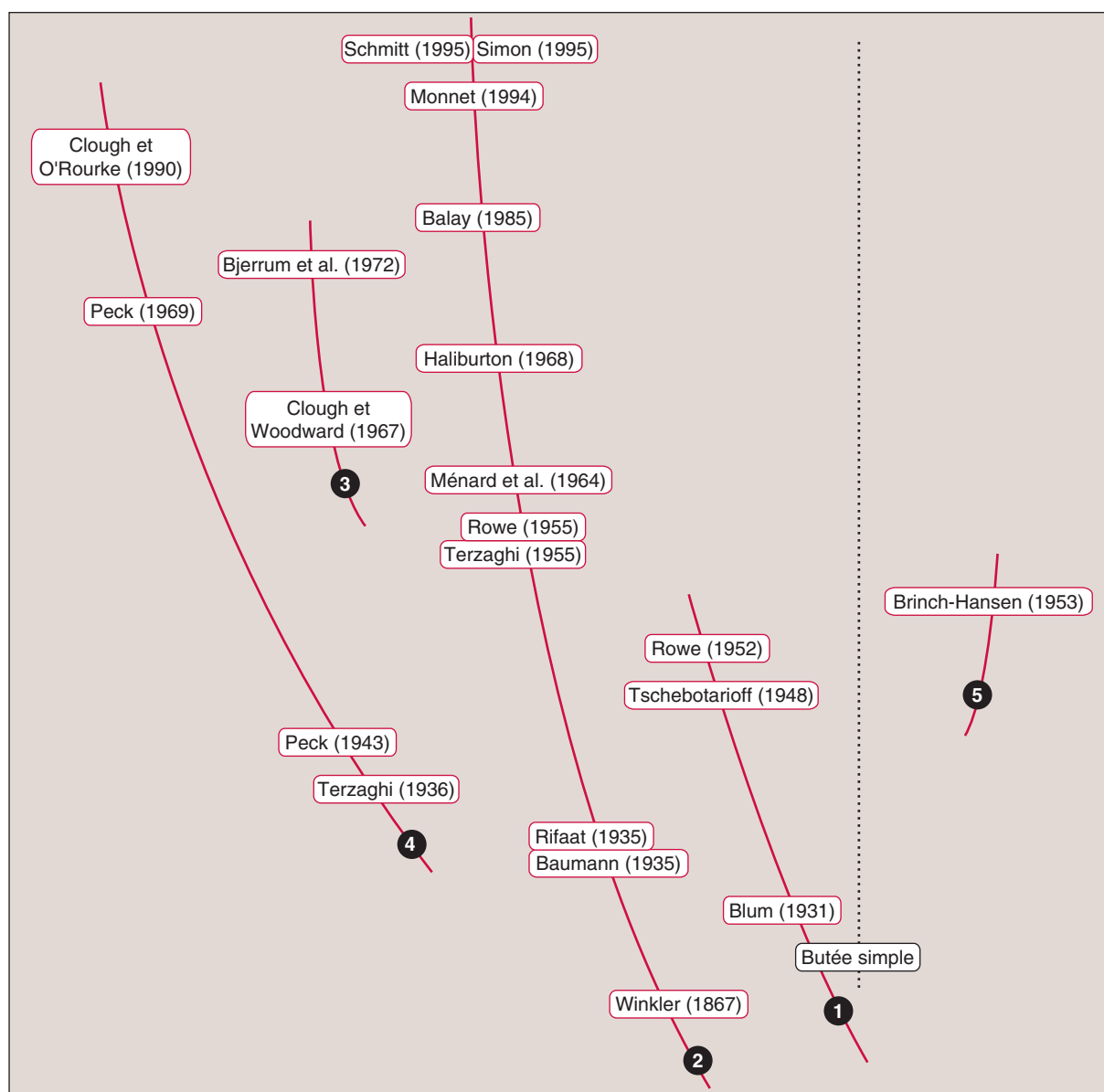


Fig. 3 - Grands axes et principaux jalons du développement des méthodes de calcul des écrans de soutènement. La partie gauche de l'arbre représente les méthodes de calcul à l'état limite de service ((1) : méthodes classiques, (2) : méthode du coefficient de réaction, (3) : méthode des éléments finis (*) et (4) : méthodes empiriques, de gauche à droite) tandis que la partie droite de l'arbre (5) représente les méthodes d'état limite ultime.

(*) La méthode des éléments finis a connu un développement important à partir des années 1970, de telle sorte qu'il n'est pas possible de faire figurer ici l'ensemble des références majeures. Seules sont indiquées les premières références relatives à l'application de la méthode des éléments finis aux ouvrages de soutènement.

- très tôt, ces approches théoriques se heurtent à des limites dans la représentation des phénomènes physiques et une branche empirique se développe ; celle-ci va rester présente tout au long du XX^e siècle et va contribuer à l'élaboration d'un référentiel en termes de comportement observé des ouvrages, référentiel toujours en usage ;
- ultérieurement, le domaine des ouvrages de soutènement va bénéficier des progrès réalisés dans les domaines de la mécanique et des méthodes numériques, pour constituer, à partir des années 1970, à l'égal des autres catégories d'ouvrages géotechniques, un champ d'application de la méthode des éléments finis.

L'article traite des travaux réalisés suivant les deux premières directions décrites précédemment, le champ de l'analyse étant par ailleurs restreint aux développements consacrés à la modélisation du comportement des ouvrages sous le chargement qu'ils sont supposés recevoir en service*. Trois principales étapes de ces développements ont été identifiées. La première est celle du passage du mur de soutènement à l'écran de soutènement, avec la modélisation de la réaction en fiche du sol. À cette première étape sont associés, d'une part, les développements en matière de méthode de calcul des équilibres limites de butée et, d'autre part, la méthode d'analyse de l'équilibre de l'écran dite de la butée simple. La deuxième étape est celle de la prise en compte de la flexibilité de l'écran dans sa partie en fiche. Cet aspect du comportement des ouvrages constitue l'enjeu central des recherches dans le domaine pendant trente ans, de 1930 à 1960, et donne lieu à de nombreuses propositions. La troisième étape est celle de la prise en compte généralisée de la flexibilité relative de l'écran et du sol, qui est rendue possible par la méthode du coefficient de réaction.

De la poussée des terres à la butée des terres – la méthode de la butée simple

La plus immédiate des méthodes de calcul des écrans de soutènement, et probablement la première, est la méthode de la butée simple. Elle fait l'hypothèse que, sous l'action de la poussée des terres, l'écran se déplace de façon rigide et mobilise en réaction, d'une part la butée du terrain le long de la partie en fiche et, d'autre part l'appui en partie supérieure (fig. 4). Cette méthode permet de réutiliser de façon immédiate les résultats relatifs à la poussée des terres mis à disposition par les théories relatives aux murs de soutènement mais elle se heurte assez vite aux insuffisances des connaissances alors disponibles en matière de butée des terres.

Ainsi, si Vauban (Kerisel, 1993) ou plus tard Poncelet (1840) faisaient déjà appel à la butée du terrain pour empêcher les murs construits dans l'argile du nord de la France de glisser sur leur base, cette butée ne jouait pas, en général, un rôle dominant dans la stabilité des murs de soutènement. Coulomb (1776) l'évoque d'ailleurs dans son mémoire mais sans faire mention de l'usage que l'on peut faire de ce concept. Plus tard, Boussinesq n'apporte des solutions à ses équations que dans le cas de la poussée des terres. Pour les écrans de soutènement, au contraire, la butée du terrain joue un rôle primordial et cette notion va faire l'objet de nouveaux développements.

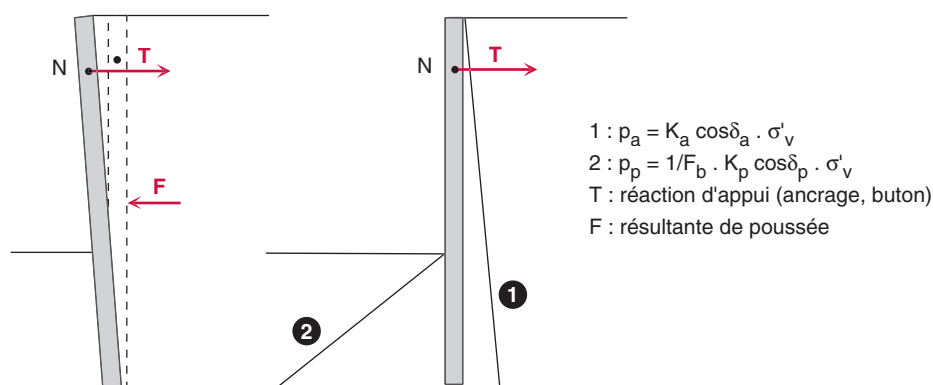


Fig. 4 - Cinématique d'un écran rigide ancré et distribution résultante des pressions (cas d'un terrain frottant homogène).

* Il s'agit donc d'approches de calcul à l'état limite de service dans la terminologie moderne.

L'extension de la méthode de Coulomb

Pour les premières justifications de l'équilibre des écrans de soutènement, le calcul de la résistance offerte par les terres en butée fait appel à la méthode de Coulomb : il s'agit d'une simple extension au calcul de la butée de la pratique alors en vigueur pour le calcul des poussées, extension d'ailleurs envisagée par Coulomb dès l'origine. Très vite ce mode de calcul est mis en défaut, tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique.

Sur la base d'observations expérimentales et dans un souci de simplification, Coulomb avait restreint l'application des « règles de Maximis et Minimis », dans le cas de la poussée, à des familles de surfaces de rupture planes. La discussion de cette hypothèse fondamentale, notamment à la fin du XIX^e siècle, a montré qu'elle était acceptable pour l'étude de la majorité des problèmes de poussée des terres alors posés à l'ingénieur. Elle reste encore largement acceptée un siècle plus tard.

En revanche, l'hypothèse de la planéité des surfaces de rupture est remise en cause pour l'étude de la butée des terres. Il est ainsi montré que l'adoption de lignes brisées, d'arcs de cercles, d'arcs de spirales logarithmiques, de combinaisons de surfaces planes et d'arcs de spirales logarithmiques ou encore de combinaisons de surfaces planes et d'arcs de cercles, pour la modélisation des surfaces de rupture, permet d'obtenir des « Minimis » de la valeur de résistance en butée du terrain inférieurs à ceux donnés par des surfaces planes. Parmi ces méthodes, la méthode d'Ohde (1938), combinant des surfaces planes et des arcs de spirales logarithmiques, est devenue la méthode « globale » de référence (fig. 5).

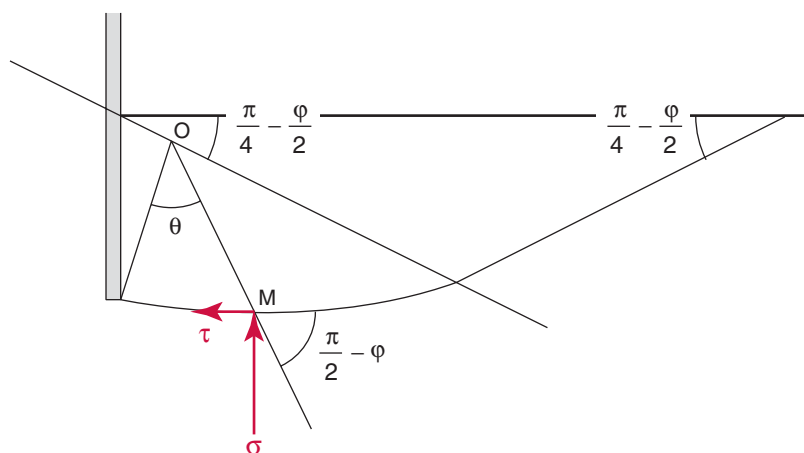


Fig. 5 - Modélisation de la surface de rupture en butée par une combinaison de surfaces planes et d'arcs de spirales logarithmiques (d'après Terzaghi, 1943).

La méthode de Boussinesq-Caquot

L'application des travaux menés par Boussinesq (1882) sur l'équilibre des massifs de sol derrière les murs de soutènement a, dans un premier temps, essentiellement concerné le problème de la poussée des terres. Deux raisons principales peuvent être avancées. D'une part, comme cela a déjà été souligné, les ingénieurs étaient alors davantage préoccupés par la question de la poussée des terres que par celle de la butée ; d'autre part, les équations proposées par Boussinesq n'étaient résolues, de façon approchée, que pour certaines configurations de la poussée des terres.

L'intérêt de cette méthode est apparu progressivement, à mesure que le problème de la butée des terres se posait avec plus d'acuité et que les insuffisances de la méthode de Coulomb se confirmaient.

Le problème de la résolution des équations issues de cette méthode a toutefois constitué un obstacle à sa mise en œuvre. Ainsi, pendant toute la première partie du XX^e siècle, la méthode de Boussinesq ne pourra pas être appliquée à l'étude de la butée des terres, la solution des équations posées par cet auteur n'étant résolue, dans le cas de la butée, qu'avec les travaux de Caquot (1934).

La publication sous forme de tables des coefficients de poussée et de butée calculés par cette méthode (Caquot et Kerisel, 1948) ainsi que son prolongement au cas des sols cohérents (théorème des états correspondants, Caquot, 1934) et au cas des massifs surchargés (poussée et butée en

milieu pulvérulent non pesant, L'herminier et Absi, 1962a, 1962b, 1965, 1969) en ont fait la méthode de référence pour le calcul de la poussée et de la butée des terres, tout au moins en France (Kerisel et Absi, 1990).

La question de l'encastrement en fiche

La méthode de Blum pour le calcul des rideaux ancrés*

Le schéma très frustré de la butée simple est mis en défaut dès que l'on met en correspondance le chargement exercé par le sol avec la déformation que prend l'écran, compte tenu de sa déformabilité réelle. C'est à cet exercice que s'est livré Blum (1931)**.

Pour un écran de soutènement ancré en tête par une nappe de tirants, Blum analyse, pour différentes longueurs de fiche, les distributions des pressions sur l'ouvrage, des moments fléchissants et des déplacements horizontaux de l'ouvrage. Cette analyse est essentiellement qualitative et repose sur l'interdépendance de ces distributions (la déformée de l'écran présente un point d'inflexion pour les points de moment nul, de même que la courbe des moments pour les points de pression nulle ; la pression mobilisée est liée au déplacement latéral de l'écran). Cette analyse permet à Blum d'observer que les ouvrages qui présentent une fiche courte seront simplement butés par le sol et que l'augmentation de la fiche conduit à la mobilisation d'un encastrement dans le sol (fig. 6).

Parmi toutes les configurations possibles, Blum estime que le meilleur compromis du point de vue de l'encastrement de l'écran est obtenu pour une fiche telle que la tangente à la déformée en pied de l'écran passe par le point d'ancrage. Les fiches plus grandes ne conduisent pas à une augmentation significative de l'encastrement de l'écran tandis que, pour des fiches plus courtes, on assiste à une chute du moment d'encastrement.

Le problème ainsi posé peut être résolu graphiquement, mais cette résolution reste néanmoins relativement longue***. Pour simplifier le calcul, Blum observe que, pour les écrans encastrés, le point de moment fléchissant nul est relativement proche du point de pression résultante nulle. Il propose, en conséquence, de conduire le calcul en considérant que le moment fléchissant est nul au point de pression nulle (« chargement approché » dit de la « poutre équivalente », fig. 7b). Une telle approximation, compte tenu de la faible différence observée entre la position du point de moment fléchissant nul et la position du point de pression résultante nulle, est supposée ne pas introduire d'erreur significative dans l'estimation du moment fléchissant maximal et de la réaction d'appui.

Par ailleurs, dans le souci de simplifier le calcul de la fiche de l'écran, Blum propose de modéliser la distribution des pressions résultantes appliquées à l'écran dans la zone en contrebutée par une force unique, appliquée au centre de rotation de l'écran (fig. 7c). La comparaison entre la fiche obtenue pour ce cas de charge « idéalisé » et celle déduite du cas de charge « approché » montre que leur rapport ne dépend que d'un coefficient n de mobilisation de la contrebutée**** (fig. 7d) et conduit Blum à proposer, comme valeur de dimensionnement de la fiche, la solution du cas de charge « idéalisé » majorée de 20 %.

Tschebotarioff

Une critique importante que l'on peut faire à la méthode proposée par Blum est d'être formulée sans référence directe à une base expérimentale. *A contrario*, les travaux menés par Tschebotarioff entre 1941 et 1949 ont essentiellement consisté en des essais, menés sur des modèles réduits d'écrans de soutènement (Tschebotarioff, 1948).

Ces essais portaient notamment sur des écrans souples fichés sur 30 % de leur hauteur totale dans des sables moyennement denses à denses et maintenus en tête par un dispositif d'appui. Les princi-

* Un développement similaire est proposé par Blum pour l'analyse des écrans non ancrés.

** La méthode du rideau encasté est attribuée à Blum (1931), Lohmeyer (1930) est cependant cité par Baumann (1935) comme étant à l'origine d'une méthode de rideau encasté.

*** La méthode graphique de résolution, dite de la ligne élastique, est maintenant mise en œuvre sous une forme numérique.

**** Ce coefficient est en fait un coefficient de flexibilité relative à l'écran dans le sol.

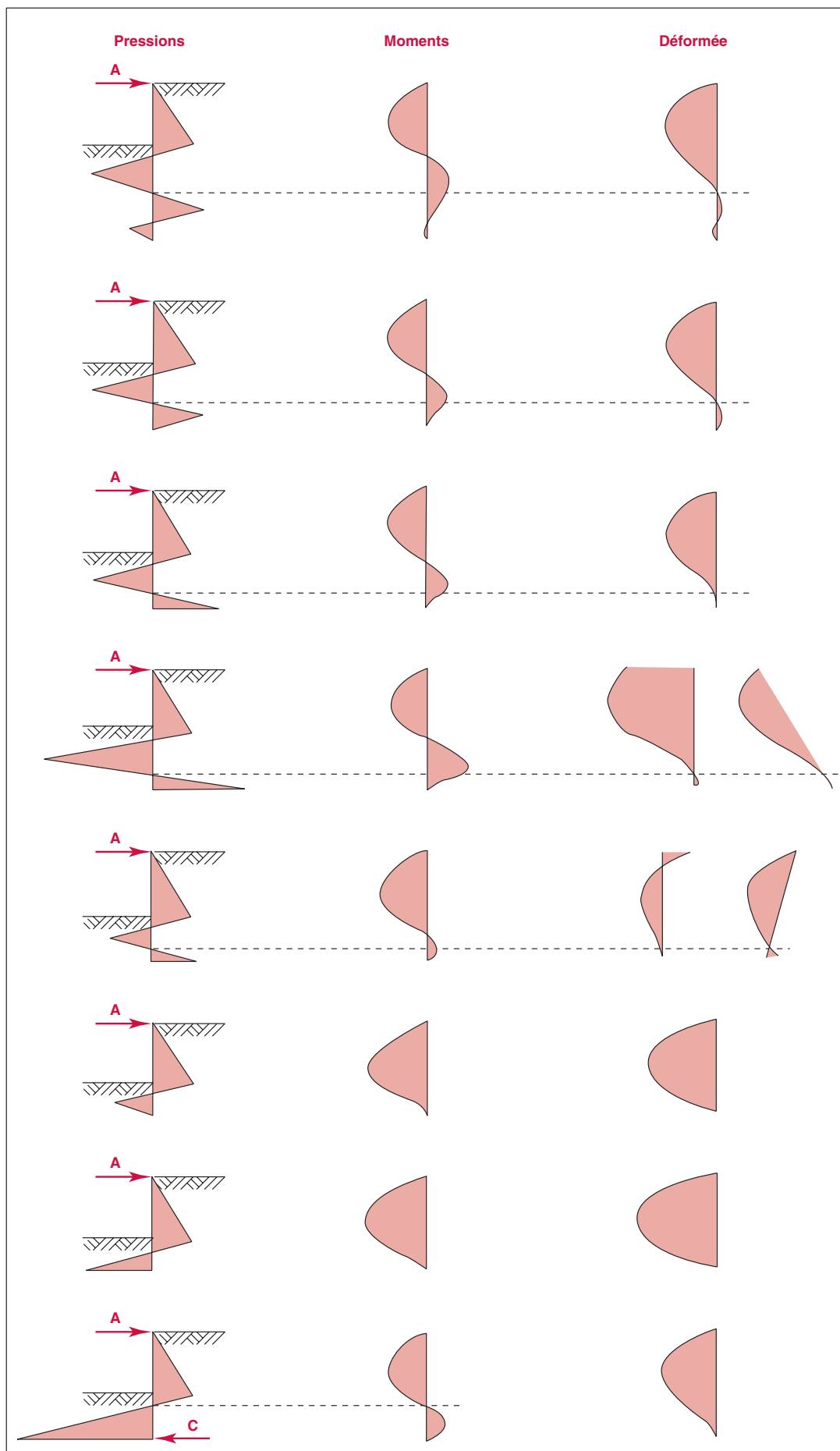


Fig. 6 - Influence de la longueur de la fiche sur les pressions sur l'écran, les moments fléchissants auxquels il est soumis et sa déformée (d'après Blum, 1931).

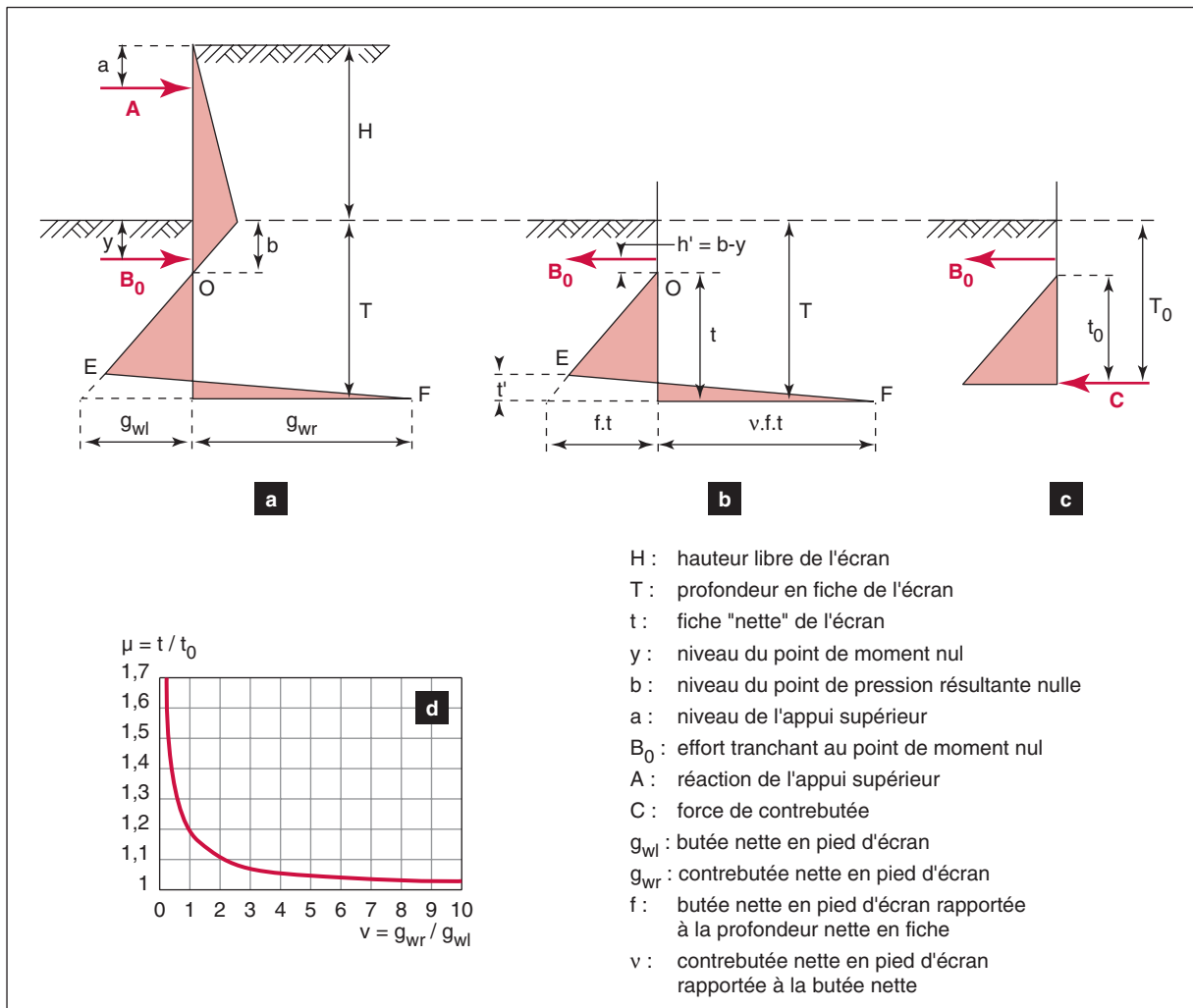


Fig. 7 - Méthode de Blum de calcul des écrans ancrés.
a. Distribution résultante des pressions du sol sur un écran ancré et encastré en fiche.
b. Chargement « approché », pour la partie en fiche. c. Chargement « idéalisé ».
d. Rapport des fiches obtenues pour les chargements b et c.

Les résultats obtenus concernent, d'une part, la distribution des pressions appliquées à l'écran par les terres soutenues et, d'autre part, la distribution des pressions en fiche de l'écran, et ceci pour différentes phases de remblaiement ou d'excavation du soutènement (fig. 8).

Qualitativement, pour les longueurs de fiche expérimentées, les résultats obtenus par Tschebotarioff confirment les hypothèses faites par Blum. Ainsi, on observe bien un encastrement de l'écran dans le sol, résultant d'une forte mobilisation de la butée dans la partie supérieure de la fiche et d'une contrebutée en partie inférieure. Cette dernière reste toutefois beaucoup plus modérée que ne le suggérait Blum dans ses schémas, puisque les valeurs atteintes sont proches de la pression des terres au repos.

Cet encastrement se traduit par un point de moment fléchissant nul qui coïncide davantage avec le niveau du fond de fouille qu'avec le niveau du point de pression résultante nulle (hypothèse de Blum). Ce dernier résultat conduit Tschebotarioff à proposer une nouvelle méthode de dimensionnement des écrans souples ancrés en tête et encastrés dans du sable, fondée sur le principe (1) d'une fiche égale à 30 % de la hauteur totale et (2) d'une articulation de l'écran au niveau du fond de la fouille (fig. 9).

Rowe

Les résultats expérimentaux de Tschebotarioff ont mis qualitativement en évidence le phénomène d'encastrement des écrans souples fichés dans des sables moyennement denses à denses.

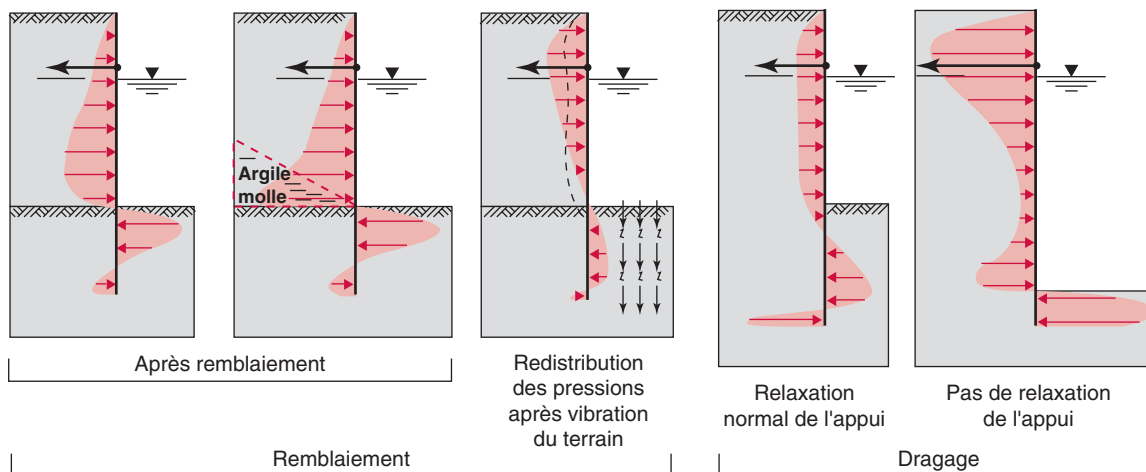
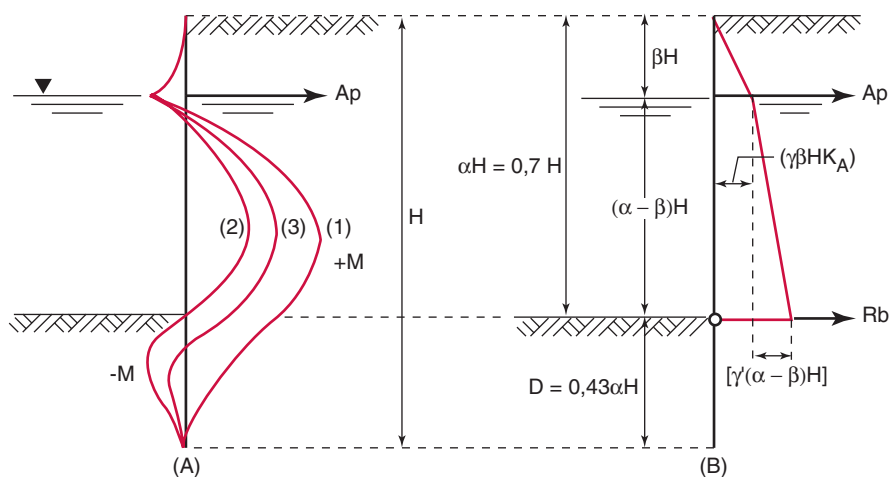


Fig. 8 - Distributions de pressions mesurées à l'issue de différentes procédures de construction (d'après Tschebotarioff et Brown, 1948).



H : hauteur totale de l'écran
 γ : poids volumique du sol
 K_A : coefficient de poussée du sol
 A_p : réaction de l'appui supérieur
 R_b : effort tranchant au niveau du fond de la fouille
 (1), (2), (3) : courbes des moments suivant différentes hypothèses d'encastrement de l'écran

Fig. 9 - Influence du degré d'encastrement de l'écran sur la distribution des moments fléchissants (A) et schéma de principe de la méthode proposée par Tschebotarioff (B), correspondant à la distribution (2) de moments fléchissants.

Par une série d'essais, également réalisés sur modèles réduits avec des matériaux de différentes densités relatives (graviers, sable, cendres, copeaux de bois), Rowe (1952) s'est attaché à analyser plus en détail ce phénomène. Ses résultats lui permettent de confirmer que, du fait de la mobilisation d'un encastrement en fiche, les sollicitations (moment fléchissant maximal, réaction d'appui) dans les écrans souples sont plus faibles que dans un écran parfaitement rigide (méthode de la butée simple). L'analyse détaillée de ces résultats permet à Rowe de montrer (fig. 10) que, pour des écrans dont la fiche est égale à 30 % environ de la hauteur totale, la réduction de sollicitation est principalement fonction de la flexibilité de l'écran (exprimée par le paramètre $\rho = \frac{H^4}{EI}$ où H désigne la hauteur totale de l'écran, E son module d'élasticité et I son inertie) et de la densité relative du sol. De plus, elle est à peu près indépendante des autres facteurs définissant les conditions des essais (angle de frottement et poids volumique du sol, surcharge sur le terre-plein, position relative de l'appui en tête d'écran).

Rowe montre, par ailleurs, que ces réductions des sollicitations peuvent excéder celles admises par Blum ou par Tschebotarioff. Ceci le conduit à évoquer des réductions supplémentaires des sollici-

tations dues à la mobilisation de butée dans le sol au-dessus du niveau d'ancrage, à la mobilisation d'une force de cisaillement en pied d'ouvrage et à l'influence de l'ancrage, de la fiche et de la flexibilité de l'écran sur les efforts verticaux appliqués à l'écran.

Rowe (1952) en déduit une nouvelle méthode de calcul des écrans encastrés. Cette méthode procède, en premier lieu, d'un calcul en butée simple, modifié pour tenir compte de la mobilisation d'une force de cisaillement en pied (fig. 11). Les sollicitations ainsi déterminées sont ensuite corrigées, à l'aide d'abaques résultant des essais (fig. 10), pour tenir compte de la flexibilité de l'écran et de l'état de densité du sol.

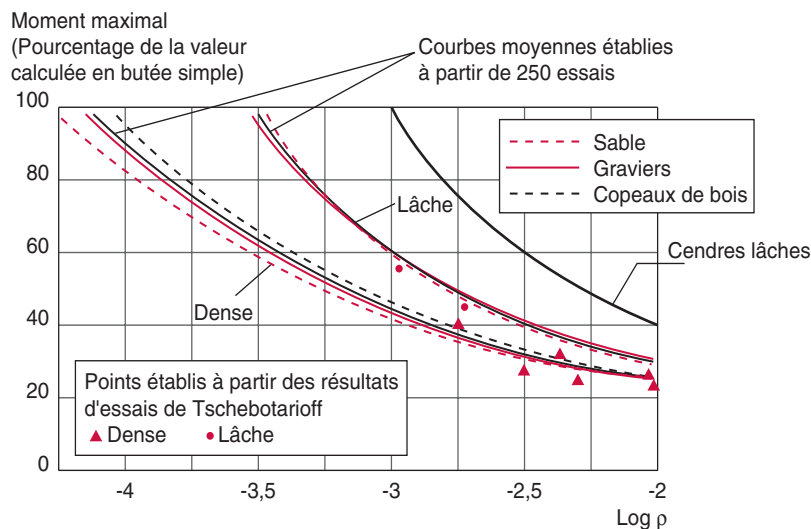


Fig. 10 - Résultats expérimentaux obtenus par Rowe (1952).

$\rho = \frac{H^4}{EI}$ caractérise la flexibilité de l'écran.

Sur cette figure, ρ est exprimé en $\text{pied}^5 / \text{livre.pouce}^2$.

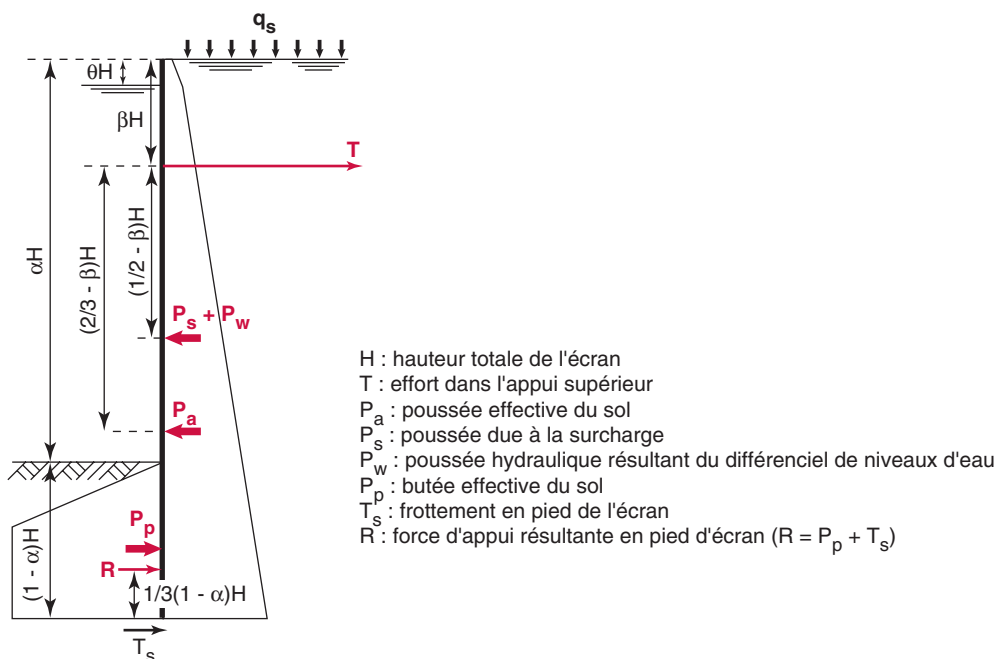


Fig. 11 - Diagramme de chargement adopté par Rowe pour le calcul en butée simple.

La méthode du coefficient de réaction

Une solution à la question de l'encastrement en fiche

Les précurseurs

La méthode de calcul des rideaux encastrés proposée par Rowe (1952) constitue un progrès important par rapport à la méthode proposée par Blum (1931) dans la mesure où elle introduit explicitement les deux facteurs qui gouvernent l'encastrement de l'écran, à savoir sa flexibilité et la raideur

du sol (liée à sa densité). Ces facteurs interviennent cependant au dernier stade du dimensionnement de l'écran, sous la forme de facteurs correctifs dans un calcul qui, à la base, ne fait intervenir ni la flexibilité de l'écran ni la raideur du sol.

La flexibilité de l'écran et la raideur du sol ne seront réellement mises au centre de la modélisation du comportement en fiche des écrans qu'avec l'introduction de la méthode du coefficient de réaction. Cette dernière, qui est générale aux interactions entre un solide et un massif encaissant, stipule que la réaction opposée par le massif encaissant au solide est constituée par une distribution de pressions le long de la surface d'interaction, dont l'intensité p en un point s'exprime par une relation de la forme $p = ky$, où y désigne le déplacement de la surface d'interaction au point considéré et k est un coefficient de réaction (Winkler, 1867).

Les premières applications de la méthode du coefficient de réaction dans le domaine du génie civil sont dues à Zimmermann (1888) pour le calcul des contraintes dans les traverses de chemins de fer*. Le développement de la méthode a ensuite concerné les fondations et les radiers. Elle a été introduite, très tôt, dans le domaine des soutènements par Rifaat (1935) et Baumann (1935)**.

Le développement de cette méthode s'est toutefois heurté au problème pratique de sa mise en œuvre. Celle-ci, nécessairement analytique avant l'apparition du calcul informatique, a fait l'objet de nombreuses propositions (Rifaat, 1935 ; Blum, 1951 ; Richart, 1957). Les méthodes proposées n'étaient toutefois pas suffisamment directes pour être pratiquées facilement dans l'ingénierie courante, en l'absence de moyen de calcul informatique.

Rowe

Les premiers résultats réellement pratiques relatifs à l'utilisation de la méthode du coefficient de réaction pour le calcul des ouvrages de soutènement sont en fait dus à Rowe (1955). Ce dernier proposa, pour une large gamme d'écrans, des abaques de réduction des sollicitations par rapport aux sollicitations calculées par la méthode de la butée simple (fig. 12).

Pour le tracé de ces abaques, Rowe (1955) a procédé à l'étude théorique de l'influence de la flexibilité relative d'un rideau ancré sur les sollicitations appliquées à l'ouvrage lorsque celui-ci est implanté en milieu pulvérulent. Cette étude a été faite par le calcul au coefficient de réaction, mis en œuvre de façon analytique, sur la base des hypothèses suivantes :

- les contraintes exercées par le sol sur la hauteur hors fiche sont les contraintes limites de poussée ;
- la réaction du sol mobilisée en un point de la face avant du rideau a pour expression :

$$p = m \frac{z}{D} y$$

où

- m est un coefficient de raideur du sol indépendant des dimensions de l'ouvrage,
- D , la fiche du rideau,
- z , la profondeur du point considéré,
- y , le déplacement de ce point,

ce qui implique que le coefficient de réaction du sol $k_h = m \frac{z}{D}$ varie linéairement en fonction de la profondeur sous le fond de fouille.

Rowe n'impose, par ailleurs, aucune limitation aux contraintes exercées par le sol sur la face avant de l'écran, le schéma de comportement « élastoplastique », qui implique que la pression du sol sur l'écran est comprise entre les pressions active et passive, n'ayant été introduit qu'ultérieurement (Haliburton, 1968).

* Terzaghi (1955), p. 298.

** Terzaghi (1955), p. 314.

Moment maximal dans l'écran
(Pourcentage de la valeur calculée en butée simple)

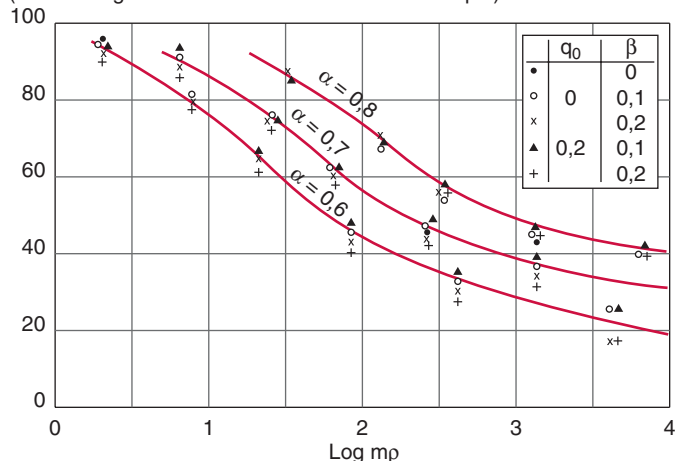


Fig. 12 - Réductions de moments fléchissants obtenues par Rowe (1955).

Sur cette figure, ρ est exprimé en pied⁵/livre.pouce² et m est exprimé en livre/pied³.

La conversion de $\log m\rho$ en une grandeur sans unité s'obtient en ajoutant 2,2 aux valeurs lues en abscisse.

Rowe a exprimé les sollicitations ainsi calculées en fonction des sollicitations évaluées par la méthode de la butée simple, de la flexibilité du rideau et de paramètres adimensionnels $\alpha = \frac{h}{H}$,

$$\beta = \frac{h_t}{H} \text{ et } q_0 = \frac{q}{\gamma H} \text{ (fig. 12) :}$$

➤ la flexibilité relative de l'écran est définie par le produit de la raideur m du sol et de la flexibilité $\frac{H^4}{EI}$ de l'écran ;

➤ $\alpha = \frac{h}{H}$, $\beta = \frac{h_t}{H}$ et $q_0 = \frac{q}{\gamma H}$ caractérisent respectivement le pourcentage de fiche, la position de l'ancrage et l'intensité relative de la surcharge sur le terre-plein.

Les résultats obtenus permirent à Rowe de constater que les paramètres jouant un rôle essentiel dans le comportement de l'écran étaient sa flexibilité relative $m \frac{H^4}{EI}$ et le rapport α de sa hauteur libre à sa hauteur totale, les autres paramètres n'ayant qu'une importance secondaire.

La méthode de calcul proposée comporte alors deux étapes, à l'instar de celle proposée en 1952 sur des bases uniquement expérimentales :

- l'évaluation des sollicitations dans l'écran par la méthode de la butée simple ;
- la réduction de ces sollicitations à l'aide des abaques établies à partir de la méthode du coefficient de réaction (fig. 12).

De l'encastrement en fiche à l'interaction sol-écran et appuis-écran

Le rôle de l'informatique

La mise en équation de la méthode du coefficient de réaction conduit à une équation différentielle du quatrième ordre dont la résolution a longtemps été un obstacle majeur au développement de son application au calcul des soutènements.

L'apparition puis le développement dans les années 1960 de l'ordinateur et du calcul informatique, en facilitant l'utilisation de procédures numériques d'intégration des équations, vont changer radicalement les données du problème. D'une part, l'utilisation pratique de la méthode du coefficient de réaction va se trouver facilitée et, d'autre part, il va être possible d'envisager la résolution de problèmes plus complexes que ceux traités jusqu'alors.

L'interaction sol-écran et appuis-écran

Les travaux menés jusqu'aux années 1960 portaient sur l'interaction de la fiche de l'écran avec le sol, le problème visé étant de mieux tenir compte de l'encastrement en fiche dans l'estimation des

efforts dans la structure. Le développement de nouvelles techniques d'intégration de l'équation d'équilibre de l'écran va autoriser l'application de la méthode du coefficient de réaction à d'autres aspects du problème. Ainsi, Turabi et Balla (1968) complètent la modélisation par la méthode du coefficient de réaction de l'encastrement en fiche par la modélisation de l'action du sol soutenu et des appuis. La poussée des terres sur l'écran est donc fonction du déplacement de ce dernier, valant la poussée au repos pour un déplacement nul de l'écran et diminuant de façon linéaire lorsque ce dernier s'écarte du sol soutenu.

Cette modélisation souffre toutefois d'une déficience importante, relative à la prise en compte des états d'équilibre limites de poussée et de butée. En effet, à l'image des modélisations antérieures de l'interaction en fiche, la pression du sol sur l'écran est simplement modélisée par une fonction linéaire du déplacement de l'écran mais n'est pas limitée par les pressions correspondant aux états d'équilibre limites de poussée et de butée. Elle peut, en conséquence, prendre des valeurs supérieures aux valeurs correspondant à la mise en butée du sol ou inférieures aux valeurs correspondant à la poussée du sol.

Un tel schéma pouvait, à la rigueur, rester acceptable pour ce qui concerne l'interaction en fiche, compte tenu du fait que, dans les conditions de service prévalant pour une analyse par la méthode du coefficient de réaction, l'ouvrage ne mobilise la butée que sur une hauteur limitée de la fiche*. Par contre, pour la modélisation des efforts développés par le sol soutenu par l'écran, ce schéma peut vite devenir inadmissible car l'état d'équilibre limite de poussée est très rapidement atteint, même dans des conditions de service.

L'introduction d'un modèle de réaction non linéaire du sol sur l'écran, intégrant les seuils correspondant aux états d'équilibre limites de poussée et de butée, est due à Haliburton (1968, fig. 13). Le modèle proposé permet en outre de traiter les appuis comme des appuis élastiques ou encore comme des déplacements imposés. Haliburton a ainsi mis en évidence les nouvelles potentialités de l'application de la méthode du coefficient de réaction au calcul des écrans de soutènement. En particulier, cette méthode se distingue alors des méthodes classiques en autorisant la prise en compte de conditions aux limites variées ainsi que de multiples niveaux d'appuis. Elle permet par ailleurs d'analyser les distributions d'efforts obtenues pour différentes configurations de l'ouvrage, le projecteur pouvant jouer sur la longueur de la fiche ou la position des appuis.

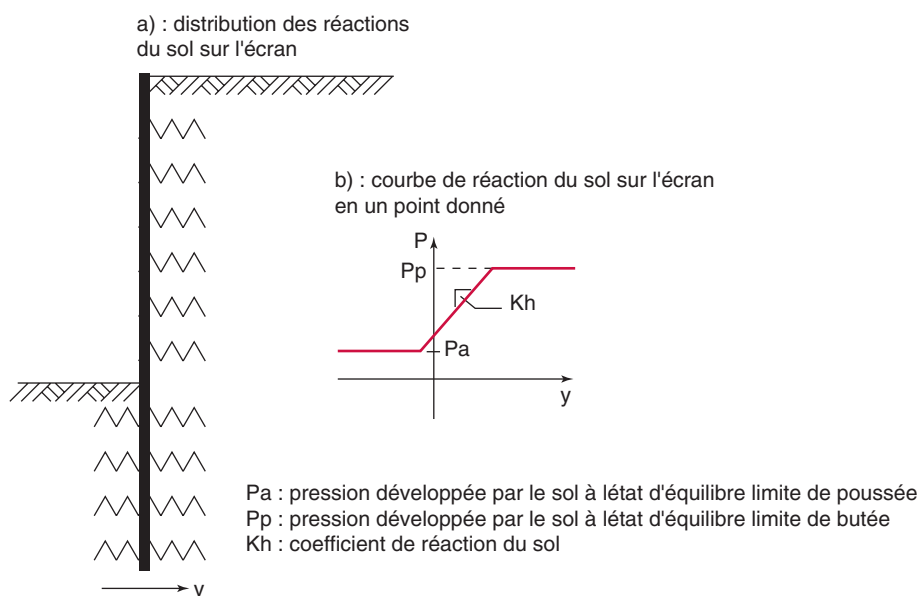


Fig. 13 - Modèle d'interaction pris en compte par la méthode du coefficient de réaction.

* Pour ce qui concerne l'interaction en fiche dans les sables, on notera que le fait de considérer des coefficients de réaction croissant avec la profondeur fait correspondre aux faibles valeurs de la contrainte limite de butée, en partie supérieure du terrain, des faibles valeurs du coefficient de réaction. Le dépassement des contraintes de butée se trouve donc limité dans une certaine mesure. Rowe (1955) relève cependant que, pour la modélisation de rideaux très souples encastés dans des sables très raides, cette modélisation peut conduire à des zones où les contraintes de butée sont notablement dépassées, ce qui entraîne une surestimation de l'encastrement en fiche.

La méthode de référence pour l'ingénierie des soutènements

Les potentialités de la méthode du coefficient de réaction, qui apparaissent clairement dans les travaux d'Haliburton (1968), furent rapidement mises à profit pour l'étude des ouvrages réels. Ainsi, dès le début des années 1970, Boudier et *al.* (1970), puis Fages et Bouyat (1971a ; 1971b) et Rossignol et Genin (1973) développèrent des logiciels spécialisés dans le calcul des écrans de soutènement par la méthode du coefficient de réaction.

Il est par ailleurs important de noter que ces développements intéressaient en tout premier lieu le calcul des ouvrages en paroi moulée, par ailleurs souvent ancrées par des tirants actifs n'autorisant pas pleinement le développement des états d'équilibre limites de poussée. La méthode de calcul venait ainsi accompagner le développement de nouvelles techniques de construction (Delattre, 2000) et non pas se substituer aux méthodes de calcul qui prévalaient pour des techniques anciennes.

La généralisation de la méthode, au cours des années 1970, conduisit au développement de nouveaux logiciels d'application, parmi lesquels DNEBOLA (Balay et *al.*, 1982). Elle conduisit également à une certaine formalisation des hypothèses de calcul et, en particulier, des règles relatives au choix des valeurs à attribuer au coefficient de réaction (Balay, 1985).

Le choix de la valeur à attribuer aux paramètres du calcul

L'application de la méthode du coefficient de réaction aux ouvrages de soutènement diffère de l'application qui en est faite aux fondations par le fait que le sol constitue à la fois le chargement et le milieu encaissant, le chargement étant dans le cas général un facteur indépendant du sol pour les fondations.

La mise en œuvre de la méthode conduit à traiter séparément les deux questions. Ainsi, pour chaque phase de travaux, le chargement appliqué à l'écran est évalué dans un premier temps, son déplacement étant supposé nul. Dans un second temps, sa position d'équilibre est recherchée, compte tenu de la mobilisation des réactions du sol, ces dernières étant décrites par les coefficients de réaction du sol et les seuils correspondant aux états d'équilibre limites de poussée et de butée.

En pratique, la question du chargement appliqué à l'écran renvoie à la notion de coefficients de compression et de décompression du sol, tandis que la question des courbes de réaction se résume à celle des coefficients de réaction, les seuils de poussée et de butée bénéficiant des développements réalisés antérieurement pour les méthodes classiques.

Coefficient de décompression ou de compression latérale du sol

Le chargement principal des écrans de soutènement est celui qui est appliqué par le terrain. Partant de la situation initiale d'équilibre qui prévaut lors de l'installation de l'écran, ce chargement comporte deux composantes. Une composante directe réside dans les contraintes appliquées à l'écran par le remblai, ou, inversement, par les contraintes qui se trouvent supprimées du fait du déblai. Une composante indirecte du chargement est pour sa part transmise à l'écran par le terrain sous-jacent au remblai ou au déblai.

L'évaluation de la composante directe de ce chargement suscite peu de discussions. Dans le cas des remblais, ces contraintes, à déplacement nul de l'écran, sont évaluées à partir du coefficient de pression du sol au repos K_0 , tandis que, dans le cas d'un déblai, ces contraintes sont définies *a priori*.

Concernant les contraintes transmises par le sol de fondation, il est également proposé, dans le cas d'un chargement en remblai (Balay et Harfouche, 1983), d'évaluer le chargement transmis par le sol sous-jacent à l'écran à partir de son coefficient de pression du sol au repos K_0 .

Dans le cas du déchargement causé par une excavation, Balay et Harfouche (1983) proposent deux options. La première, qualifiée « d'irréversible », consiste à considérer que la contrainte horizontale n'est pas modifiée tant que celle-ci ne devient pas supérieure à la contrainte de butée. La seconde, qualifiée de « réversible », consiste à considérer que le déchargement s'effectue suivant la pente K_0 du premier chargement (tant que la contrainte ne devient pas inférieure à la contrainte de poussée).

Monnet (1994) propose pour sa part, dans le cas du déchargement, de calculer la diminution de contrainte horizontale comme une fraction de la diminution de contrainte verticale :

$$\Delta\sigma_h = K_d\Delta\sigma_v$$

où K_d désigne un coefficient de décompression du sol.

L'analyse des résultats de travaux menés par différents auteurs sur le comportement du sol soumis à un déchargement en conditions œdométriques conduit Monnet à proposer pour K_d l'expression :

$$K_d = \frac{1}{2}(1 - \sin\varphi)(3 - 3\sin\varphi).$$

On remarque que cette expression conduit à considérer un chemin de contrainte linéaire au déchargement, de pente relativement proche de celle considérée par Mayne et Kulhawy (1982) pour le rechargement.

La détermination des coefficients de réaction

Le dimensionnement d'un ouvrage par les méthodes de calcul classiques nécessite de choisir le diagramme des efforts qui est appliqué à l'écran. Ce choix d'un état de contraintes sur l'écran impose en réalité au concepteur de s'interroger sur les déformations que subit le sol compte tenu des dispositions prévues pour l'ouvrage (rigidité de l'écran et de ses appuis, nature du terrain et procédure de construction de l'ouvrage). C'est en effet en considérant ces dispositions que le concepteur va pouvoir faire l'hypothèse que telle partie du massif de sol reste dans un état voisin de l'état au repos tandis que telle autre se trouve décomprimée et donc voisine d'un état actif.

Par rapport aux méthodes classiques, la méthode du coefficient de réaction permet de ne plus avoir à répondre *a priori* à ces questions. Les hypothèses ne portent plus sur les déformations, qui deviennent un résultat du calcul, mais sur la distribution des rigidités. C'est en effet cette dernière qui, introduite dans le calcul, détermine l'équilibre.

L'analyse des hypothèses du calcul doit donc porter sur la répartition des coefficients de réaction sur l'écran, de la rigidité des appuis et de la rigidité de l'écran.

Terzaghi

Les deux contributions majeures pour l'évaluation du coefficient de réaction sont le fait de Terzaghi (1955) et de Ménard *et al.* (1964).

La discussion d'études expérimentales du comportement de structures encastrees dans le sol (Rifaat, 1935 ; Loos et Breth, 1949), ainsi que de celles consacrées aux autres catégories d'ouvrages de la géotechnique, complétée par des considérations théoriques sur la notion de coefficient de réaction, amenèrent Terzaghi (1955) à formuler des règles générales pour le choix des coefficients de réaction à introduire dans les calculs. Pour le calcul des écrans de soutènement, Terzaghi proposa de considérer un coefficient croissant de façon linéaire avec la profondeur dans le cas d'ouvrages fondés sur du sable et un coefficient de réaction constant dans le cas des argiles raides. Par ailleurs, Terzaghi montra que le coefficient de réaction est d'autant plus faible que le terrain se trouve sollicité sur une surface de grande dimension et que la raideur de ce dernier est faible.

Cette analyse conduisit Terzaghi à exprimer le coefficient de réaction sous la forme :

$$k_h = l_h \frac{z}{D}$$

dans le cas des sables et sous la forme :

$$k_h = k_{h1} \frac{1}{D}$$

dans le cas des argiles raides.

Dans ces expressions, z désigne le niveau considéré de la fiche, D la « longueur sollicitante », dépendant de la longueur en fiche de l'ouvrage et du mode de fonctionnement de l'ouvrage, l_h une

constante caractérisant les sables, compte tenu de leurs états de densité et de la présence d'une nappe d'eau, et k_{h1} une constante caractérisant les argiles compte tenu de leur consistance.

Ménard

La contribution de Ménard fait appel à la théorie établie par Ménard et Rousseau (1962)* pour le calcul du tassement des fondations superficielles à partir de considérations basées sur la théorie de l'élasticité et d'ajustements empiriques. La transposition des résultats obtenus à la réaction opposée par le sol à la mobilisation en fiche de l'écran conduit à exprimer le coefficient de réaction sous la forme (Ménard et Rousseau, 1962 ; Ménard et *al.*, 1964) :

$$k_h = \frac{E_M}{\frac{\alpha a}{2} + 0,133(9a)^\alpha}$$

où

- E_M désigne le module pressiométrique du sol,
- a la « longueur sollicitante », dépendant de la longueur en fiche de l'ouvrage et du mode de fonctionnement de l'ouvrage,
- et α un coefficient rhéologique dépendant de la nature du sol.

La généralisation de la méthode, au cours des années 1970, conduisit à une certaine formalisation des hypothèses de calcul et en particulier des règles relatives au choix des valeurs à attribuer au coefficient de réaction (Balay, 1985). Concernant les coefficients de réaction à considérer pour la partie en fiche, ces recommandations reprennent les propositions faites par Ménard et *al.* (1964), un correctif étant toutefois apporté lorsque la fiche de l'ouvrage est supérieure à sa hauteur libre (ouvrages fortement encastés). Ces propositions de Ménard sont, par ailleurs, étendues à la partie supérieure du soutènement (à la réaction des terrains soutenus), des dispositions particulières étant proposées pour la réaction du terrain concerné par la mise en précontrainte des appuis. Ces dernières dispositions sont tirées de l'analyse, par la méthode des éléments finis, de la réaction d'un massif élastique à une structure chargée ponctuellement et s'appuient sur le comportement observé de plusieurs ouvrages de soutènement (Gigan, 1984).

Un sujet encore très discuté

Les travaux fondateurs de Terzaghi (1955) ou de Ménard et Rousseau (1962) ont traité en premier lieu de l'application de la méthode du coefficient de réaction aux ouvrages les plus simples, les fondations superficielles, et ont proposé des extensions, d'abord aux fondations profondes chargées latéralement, puis aux soutènements. Dans la pratique, les propositions faites pour les fondations superficielles et les pieux ne suscitent plus que peu de discussion. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les écrans de soutènement, pour lesquels la question de la distribution des coefficients de réaction reste largement discutée.

Les propositions récentes empruntent deux voies principales. La première (Simon, 1995) consiste à raisonner de façon moins forfaitaire que ne le propose Balay quant à l'estimation des longueurs sollicitantes a intervenant dans les formules de Ménard. Le massif de sol sollicité par l'écran se trouve ainsi découpé en autant de parties que son mode de fonctionnement le rend nécessaire, les zones en compression et les zones en décompression étant traitées comme autant de zones à distinguer de façon précise dans l'application des formules de Ménard.

La seconde voie (Schmitt, 1984, 1995, 1998) repose sur le caractère non linéaire de la loi de réaction du sol sur l'écran. Ainsi, les coefficients de réaction proposés par Ménard constitueraient une approximation satisfaisante lorsque le déplacement de l'écran est important, mais sous-estimeraient la réaction réelle du sol dans le domaine des plus petites déformations. Cette analyse, complétée d'une analyse portant également, à l'instar de Simon, sur la valeur de la dimension sollicitante a , compte tenu notamment de la rigidité en flexion de la paroi, conduit Schmitt à proposer des coefficients de réaction sensiblement plus élevés que ceux qui sont tirés des travaux de Ménard.

* Voir aussi Cassan (1978, tome 2), p. 65.

L'alternative de Chadeisson

L'alternative proposée par Chadeisson* (in Monnet, 1994) consiste à établir la valeur du coefficient de réaction sur la base de la résistance au cisaillement du sol, caractérisée par la cohésion et l'angle de frottement. Cette proposition, qui prend la forme d'une abaque, ne comporte *a priori* pas d'autre justification que l'expérience. Des éléments de justification ont été apportés *a posteriori* par Monnet (1994), lequel propose, par ailleurs, des développements à ces propositions, tandis que Londez et al. (1997) illustrent sur un ouvrage réel l'utilisation de cette abaque de Chadeisson.

Les méthodes hybrides

Les limites de la méthode du coefficient de réaction ont conduit certains auteurs à proposer des méthodes hybrides pour lesquelles la réaction du sol sur l'écran est calculée, pour chaque étape de travail, en considérant que le massif de sol se comporte comme un massif élastique. La réaction d'un tel massif au déplacement de l'écran peut alors s'appuyer sur les développements de la théorie de l'élasticité (Vaziri et Troughton, 1992 ; Vaziri, 1995, utilisant les équations de Mindlin et des développements complémentaires ; Papin et al., 1992, in Potts, 1992 ; Creed et O'Brien, 1991, faisant appel à des méthodes numériques), cette réaction étant bien entendue limitée par les seuils habituels correspondant aux états d'équilibre limites de poussée et de butée.

Conclusions

L'approche par le calcul de l'équilibre en service des écrans de soutènement a accompagné tout au long du XX^e siècle le développement et la diversification de cette technique, depuis les écrans rigides aux écrans souples, simplement encastrés ou ancrés par une seule nappe de tirants passifs dans un premier temps, aux écrans ancrés par plusieurs nappes.

Cette approche est centrée, depuis le début du XX^e siècle jusqu'aux années 1970, sur l'évaluation des sollicitations auxquelles sont soumis les ouvrages. La question des déformations des ouvrages et du terrain avoisinant n'est donc pas abordée, tout au moins de façon explicite.

Les travaux menés dans ce cadre intéressent principalement deux aspects de l'interaction sol-écran de soutènement :

- d'une part, ils viennent compléter l'analyse des états d'équilibre limite de poussée et de butée du sol entreprise aux XVIII^e et XIX^e siècles ; ont ainsi été mis à la disposition des ingénieurs les prolongements des méthodes de Coulomb et de Boussinesq qui permettent l'analyse des états d'équilibre de butée aussi bien que de poussée ;
- d'autre part, ils tentent d'apporter une réponse à la question des conditions d'appui de l'écran dans le sol dans la partie en fiche, question déterminante pour l'évaluation des efforts auxquels est soumis l'ensemble de l'écran. Cette réponse, venue progressivement, a donné lieu à un ensemble de méthodes de calcul dont chacune tente d'embrasser un point de vue élargi par rapport aux méthodes précédemment élaborées. Il en résulte que ces méthodes ne sont pas équivalentes du point de vue de leur domaine d'emploi, ce dernier pouvant être relativement restreint pour les méthodes les plus frustes.

Cette approche s'est par contre relativement désintéressée de l'interaction de l'écran avec le sol soutenu. L'hypothèse restée en usage jusqu'aux années 1970 est celle d'un état d'équilibre limite de poussée du sol soutenu, les actions résultantes sur l'écran étant évaluées à partir des méthodes de Coulomb, de Rankine ou de Boussinesq ou de leurs prolongements. Ainsi, si l'on se réfère aux différentes formes de l'interaction sol-écran de soutènement, on est conduit à observer que ces méthodes de calcul n'ont pas apporté de solution bien établie au problème des effets de voûte sur les écrans souples et à celui de la dépendance des poussées des terres à la cinématique générale de l'écran.

La généralisation de la méthode du coefficient de réaction à partir des années 1970 permet de mettre fin aux errements antérieurs en matière d'encastrement de l'écran dans le sol en proposant une

* Il s'agit, au départ, de règles internes au bureau d'étude de Solétanche, élaborées dès les années 1970 sur la base des ouvrages réalisés par l'entreprise. Leur publication est due à Monnet (1994).

solution tenant compte des propriétés du sol et de l'écran. Elle autorise, par ailleurs, la prise en compte de nouvelles conditions d'interaction de l'écran avec la partie soutenue du massif de sol par rapport au simple schéma de poussée active qui prévalait antérieurement. Le chargement de l'écran dans la partie soutenue peut ainsi résulter d'états du sol intermédiaires aux états d'équilibre limites de poussée et de butée, situation qui apparaît avec le développement des tirants actifs.

Cette généralisation de la méthode du coefficient de réaction ne doit cependant pas faire oublier qu'elle ne traite qu'imparfaitement de l'interaction sol-écran de soutènement. Ainsi, à l'instar des méthodes classiques qui l'ont précédée, elle ne va pas jusqu'à intégrer des propositions permettant la prise en compte des effets de voûte au voisinage des appuis ou la cinématique générale de l'écran et elle ne donne accès que de façon très médiocre aux déformations subies par l'ouvrage. L'évaluation des paramètres auxquels elle fait appel (coefficient de réaction et coefficient de décompression, en particulier) reste par ailleurs une réelle difficulté.

Ces aspects imparfaitement traités ou laissés en blanc par les méthodes classiques et la méthode du coefficient de réaction laissent entrevoir le champ occupé parallèlement par les méthodes empiriques et semi-empiriques. Il met également en perspective les apports à attendre de l'application aux écrans de soutènement des méthodes par éléments finis, qui autorisent la prise en compte de davantage de facettes de l'interaction sol-structure. Ces deux volets feront l'objet de deux articles complémentaires du présent article, à paraître dans le bulletin des LPC.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALAY J., *Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction*, Note d'information technique, Paris, LCPC, **1985**, 24 pages.

BALAY J., HARFOUCHE L., *Programme DENEbola pour le calcul des soutènements par la méthode des modules de réaction*, Notice d'utilisation, Paris, LCPC, **1983**, 82 pages.

BALAY J., FRANK R., HARFOUCHE L., Programme DENEbola pour le calcul des soutènements par la méthode des modules de réaction, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **120**, juillet-août **1982**, pp. 3-12.

BAUMANN P., *Analysis of sheet-pile bulkheads*, Trans. ASCE, Vol. 100, **1935**, pp. 707-797.

BLUM H., *Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken*, Berlin, W. Ernst & Sohn, **1931**, 32 pages.

BLUM H., *Beitrag zur Berechnung von Bohlwerken*, Berlin, W. Ernst & Sohn, **1951**, 27 pages.

BJERRUM L., FRIMANN CLAUSEN C.J., DUNCAN J.M., *Earth pressure on flexible structures – A state of the art report*, Comptes-rendus du Ve CEMSTF (Madrid), Ed. SEMSC, Vol. 2, **1972**, pp. 169-196.

BOUDIER J., COLIN C., MASTIKIAN L., Calcul de stabilité des parois sur ordinateur – Exemples d'application, *Travaux*, **429**, **1970**, pp. 40-45.

BOUSSINESQ J., Note sur la détermination de l'épaisseur minimum que doit avoir un mur vertical, d'une hauteur et d'une densité données, pour contenir un massif terreux, sans cohésion, dont la surface est horizontale, *Annales des Ponts et Chaussées*, Tome 3, **1882**, pp. 623-643.

BRINCH HANSEN J., *Earth pressure calculation*, Copenhagen, The Danish Technical Press, The Institution of Danish Civil Engineers, **1953**, 271 pages.

CAQUOT A., Equilibre des massifs à frottement interne – Stabilité des terres pulvérulentes ou cohérentes, Paris, Gauthier-Villars, **1934**.

CAQUOT A., KÉRISSEL J., *Tables de butée, de poussée et de force portante des fondations*, Paris, Gauthier-Villars, **1948**.

CASSAN M., *Les essais in situ en mécanique des sols – Tome 2 : Applications et méthodes de calcul*, Paris, Eyrolles, **1978**, 331 pages.

CLOUGH G.W., O'ROURKE T.D., *Construction induced movements of in situ walls*, Proc. of the Conf. on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Ithaca (New York), Cornell University, **1990**, pp. 439-470.

CLOUGH R.W., WOODWARD R.J., Analysis of embankment stresses and deformations, Proc. ASCE, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 93, **SM4**, **1967**, pp. 529-549.

COULOMB C.A., Sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture, *Mémoires de l'Académie des Sciences présentés par des savants*, **7**, **1776**, pp. 343-382.

- CREED M.J., O'BRIEN J.M., *Simplified finite element analysis of an embedded retaining wall*, Comptes-rendus du X^e CEMSTF (Florence), Rotterdam Balkema, Vol. 2, **1991**, pp. 687-690.
- DELATTRE L., *Comportement des écrans de soutènement – Expérimentations et calculs*, Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, ENPC, **1999**, 498 pages.
- DELATTRE L., Un siècle d'écrans de soutènement – Revue bibliographique sur l'évolution des techniques, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **227**, juillet-août **2000**, pp. 51-61.
- FAGES R., BOUYAT C., Calcul de rideaux de parois moulées ou de palplanches – Modèle mathématique intégrant le comportement irréversible du sol en état élasto-plastique, *Travaux*, **439**, **1971a**, pp. 49-51.
- FAGES R., BOUYAT C., Calcul de rideaux de parois moulées ou de palplanches – Modèle mathématique intégrant le comportement irréversible du sol en état élasto-plastique – Exemple d'application – Etude de l'influence de paramètres, *Travaux*, **441**, **1971b**, pp. 38-46.
- GIGAN J.-P., Expérimentation d'un rideau de palplanches ancré par tirants actifs, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **129**, janvier-février **1984**, pp. 5-20.
- HALIBURTON T.A., Numerical analysis of flexible retaining structures. Proc. ASCE, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 94, **SM6**, **1968**, pp. 1233-1251.
- KÉRISEL J., *History of retaining walls design*, Proc. of the Conf. Retaining Structures (Instn of Civ. Eng., Cambridge, 20-23 juillet 1992), Londres, Thomas Telford, **1993**, pp. 1-16.
- KÉRISEL J., ABSI E., *Tables de poussée et de butée des terres*, Paris, Presses des Ponts et Chaussées, 3^e éd., **1990**, 240 pages.
- L'HERMINIER R., ABSI E., Equilibre limite d'un coin dans un milieu non pesant, *Annales de l'ITBTP*, **179**, **1962a**, pp. 1081-1086.
- L'HERMINIER R., ABSI E., Tables numériques de poussée en milieu pulvérulent non pesant, *Cahiers de la Recherche*, **16**, **1962b**, Paris, Eyrolles.
- L'Herminier R., Absi E., Equilibre limite d'un coin dans un milieu non pesant – Détermination des lignes de discontinuité, *Annales de l'ITBTP*, **210**, **1965**, pp. 817-821.
- L'HERMINIER R., ABSI E., Tables numériques de butée en milieu pulvérulent non pesant, *Cahiers de la Recherche*, **28**, **1969**, Paris, Eyrolles, 54 pages.
- LOHMEYER, *Der Grundbau*, 4e ed., Vol. 2, **1930**.
- LOOS W., BRETH H., Modellversuche über Biegebeanspruchung von Pfählen und Spundwänden, *Bauingenieur*, **24**, **1949**, Heft 6.
- LONDEZ M., NAMUR S., SCHMITT P., *Analyses des mesures de déformations d'une paroi moulée à Colombes*, Comptes-rendus du XIV^e CIMSTF (Hambourg), Rotterdam, Balkema, Vol. 2, **1997**, pp. 1323-1326.
- MAYNE P.W., KULHAWY F.H., K₀ – OCR Relationship in soil. Proc. ASCE, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 108, **GT6**, **1982**, pp. 851-872.
- MÉNARD L., BOURDON G., HOUY A., Etude expérimentale de l'encastrement d'un rideau en fonction des caractéristiques pressiométriques du sol de fondation, *Sols-Soils*, **9**, **1964**, pp. 11-27.
- MÉNARD L., ROUSSEAU J., L'évaluation des tassements – Méthodes nouvelles, *Sols-Soils*, **1**, **1962**, pp. 13-28.
- MONNET A., Module de réaction, coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul élastoplastique, *Revue française de Géotechnique*, **65**, **1994**, pp. 67-72.
- OHDE J., *Zur Theorie des Erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung*, Die Bautechnik, **1938**, Heft 10/11, 13, 19, 25, 37, 42, 53/54.
- PAPIN J.W., SIMPSON B., FELTON P.J., RAISON C., *Numerical analysis of flexible retaining walls*, Proc. Numerical Methods in Eng. Theory and Applications 85 Conference (Swansea), **1992**, pp. 789-802.
- PECK R.B., *Earth Pressures Measurements in Open Cuts Chicago Subway*, Trans. ASCE, **108**, **1943**, pp. 1008-1036.
- PECK R.B., *Deep excavations and tunneling in soft ground*, Comptes-rendus du VII^e CIMSTF (Mexico), Ed. SMMS, Vol. d'état de l'art, **1969**, pp. 225-290.
- PONCELET J.V., Mémoire sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations, Paris, *Mém. de l'officier du génie*, **13**, **1840**, pp. 7-226.
- POTTS D.M., *The analysis of earth retaining structures*, Proc. of the Conf. Retaining Structures (Instn of Civ. Eng., Cambridge, 20-23 juillet 1992), Londres, Thomas Telford, **1992**, pp. 167-186.
- RANKINE W.J.M., *On the stability of loose earth*, Trans. Roy. Soc. London, Vol. 147, **1857**.

- RICHART F.E. JR, *Analysis for sheet-pile retaining wall*. Transactions, ASCE, Vol. 122, **1957**, pp. 1113-1138.
- RIFAAT I., Die Spundwand als Erddrückproblem. Mitteilungen aus dem Institut für Baustatik, Eidgen, *Techn. Hochschule Zürich*, **5**, **1935**, Leipzig und Zürich.
- ROSSIGNOL P., GENIN M.-J., Calculs de rideaux de parois moulées avec le programme Paroi : exemples d'application, *Travaux*, **465**, **1973**, pp. 65-67.
- ROWE P.W., *Anchored sheet-pile walls*, Proc. Instn Civ. Engrs, Pt I, Vol. 1, **1952**, pp. 27-70.
- ROWE P.W., *A theoretical and experimental analysis of sheet-pile walls*, Proc. Instn Civ. Engrs, Pt I, Vol. 4, **1955**, pp 32-69.
- SCHMITT P., Etude expérimentale de la sollicitation exercée par le sol sur les ouvrages de soutènement souples, *Revue française de Géotechnique*, **28**, **1984**, pp. 27-40.
- SCHMITT P., Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis à vis des ouvrages de soutènement souples, *Revue française de Géotechnique*, **71**, **1995**, pp. 3-10.
- SCHMITT P., De l'élasticité linéaire au coefficient de réaction : théories, observations et ordres de grandeur, *Revue française de Géotechnique*, **85**, **1998**, pp. 79-87.
- SIMON B., Commentaires pour le choix des coefficients de réaction pour le calcul des écrans de soutènement, *Revue française de Géotechnique*, **71**, **1995**, pp. 11-19.
- TERZAGHI K., *Distribution of lateral pressure of sand on the timbering of cuts*, Proc. First Int. Conf. Soil Mech. (Harvard), Vol. 1, **1936**, pp. 211-215.
- Terzaghi K., *Theoretical Soil Mechanics*, New York, John Wiley & Sons, **1943**, 510 pages.
- TERZAGHI K., Evaluation of coefficients of subgrade réaction, *Géotechnique*, **4**, **1955**, pp. 297-326.
- TSCHEBOTARIOFF G.P., *Large scale model earth pressure tests on flexible bulkheads*, Proc. ASCE, janvier 1948, pp. 9-48 ; Trans. ASCE, **1949**, pp. 415-455, 524-539.
- TSCHEBOTARIOFF G.P., BROWN P.P. (1948), *Lateral earth pressure as a problem of deformation or of rupture*. Comptes-rendus du Ile CIMSTF, Vol. II, **1948**, pp. 81-86.
- TURABI D.A., BALLA A., Distribution of earth pressure on sheet-pile walls, Proc. ASCE, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 94, **SM6**, **1968**, pp. 1271-1301.
- VAZIRI H.H., TROUGHTON V.M., An efficient three-dimensional soil-structure interaction model for analysis of earth retaining structures, *Revue canadienne de Géotechnique*, **29**, **1992**, pp. 529-538.
- VAZIRI H.H., Theory and application of an efficient computer program for analysis of flexible earth-retaining structures, *Computers and Structures*, Vol. 16, **1**, **1995**, pp. 177-187.
- WINKLER E., *Die Lehre von Elastizität und Festigkeit*, Prague, H. Dominicus, **1867**.
- ZIMMERMANN H., *Die Berechnung des Eisenbahn Oberbaues*, Berlin, **1888**.