

Flexibilité et dimensionnement des écrans de soutènement ancrés

RÉSUMÉ

L'article présente les résultats d'une étude paramétrique par la méthode du coefficient de réaction du comportement des écrans de soutènement mis en place dans un sol frottant et ancrés en tête par une nappe de tirants.

Dans une première partie, les auteurs abordent la question de la flexibilité des écrans de soutènement. Après avoir souligné les insuffisances de la méthode proposée par Rowe pour la prise en compte de la flexibilité de l'écran, ils présentent une nouvelle méthode. Cette dernière substitue le comportement de l'écran à l'équilibre limite de défaut de fiche au comportement du rideau rigide, considéré comme comportement de référence par Rowe pour l'analyse de la flexibilité de l'écran. Sur cette nouvelle base, les sollicitations dans l'écran sont estimées en tenant compte, d'une part, de la flexibilité de l'écran et, d'autre part, de la surlongueur de fiche que présente l'écran par rapport à la fiche correspondant à l'équilibre limite.

Dans une seconde partie, cette étude compare les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations calculées en prédimensionnement par les méthodes classiques. Le rapport entre ces sollicitations ne dépend que de la flexibilité en fiche et, pour les écrans prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec minoration *a priori* de la butée, du chargement de l'écran. Les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction sont voisines des sollicitations calculées en prédimensionnement par la méthode de la ligne élastique pour les rideaux souples et par la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche pour les écrans plus rigides. Dans tous les cas, la méthode de la butée simple avec minoration *a priori* de la butée majore sensiblement les sollicitations calculées dans l'écran par rapport à la méthode du coefficient de réaction.

MOTS CLÉS : 42 - Ancrage - Flexibilité - Sollicitation - Dimensionnement - Écran de soutènement.

Luc DELATTRE*

ITPE

Chef de la section Comportement des sols et des ouvrages géotechniques
Division Mécanique des sols et des roches et géologie de l'ingénieur

Henri JOSSEAUME**

Division Mécanique des sols et des roches et géologie de l'ingénieur

Laurent MESPOULHE***

Assistant technique des TPE

Section Comportement des sols et des ouvrages géotechniques
Division Mécanique des sols et des roches et géologie de l'ingénieur

Thierry DELMER****

ITPE

Stagiaire

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Introduction

Les méthodes de calcul les plus couramment utilisées en France pour le dimensionnement des écrans de soutènement sont, d'une part, les méthodes dites classiques et, d'autre part, la méthode du coefficient de réaction. Les premières ont été développées au cours des années 1930 pour le calcul des écrans étayés par des systèmes d'appui permettant un déplacement de l'ouvrage compatible avec le développement d'un équilibre limite de poussée dans le massif retenu. Elles sont encore fréquemment appliquées au calcul de ce type d'ouvrage (principalement au calcul des rideaux de palplanches ancrés par une nappe de tirants passifs). La méthode du coefficient de réaction est principalement employée pour le calcul des parois moulées et des rideaux de palplanches ancrés par une ou plusieurs nappes de tirants actifs, qui ne sont pas justiciables du calcul classique. Elle est, en outre, de plus en plus souvent utilisée pour le calcul des écrans ancrés par tirants passifs.

Cependant, les résultats de ces diverses méthodes n'ont pas fait l'objet, à ce jour, de comparaison systématique dans le domaine d'application qui leur est commun, c'est-à-dire le domaine des écrans étayés par une nappe de tirants passifs. C'est pour combler, en partie, cette lacune que nous avons procédé au calcul par la méthode du coefficient de réaction des sollicitations appli-

Actuellement :

* Sous-directeur des Programmes et de la coordination générale des laboratoires régionaux au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

** En retraite.

*** À la cellule départementale des Ouvrages d'art à la Direction départementale de l'Équipement du Lot.

**** En détachement au Bureau des Bâtiments.

quées à des ouvrages de ce type préalablement dimensionnés par les différentes méthodes classiques. L'étude a été faite dans le cas de rideaux de palplanches mis en place en milieu homogène purement frottant et sollicités par excavation partielle du massif aval et par surcharge du terre-plein amont. Les caractéristiques des ouvrages, leurs conditions de chargement et l'angle de frottement interne du sol ont été choisis dans des gammes assez larges pour que les conclusions de l'étude soient applicables à de nombreux ouvrages courants. L'analyse des résultats obtenus a permis de mieux cerner les domaines respectifs de validité des méthodes classiques sur la base du calcul aux coefficients de réaction pris comme référence. Il faut cependant noter que, si le modèle élastoplastique pris en compte dans ce type de calcul rend mieux compte du comportement réel du sol que le modèle rigide-plastique sur lequel s'appuient les calculs classiques, il est cependant très imparfait. L'étude présentée ici ne doit donc pas être considérée comme un essai de validation des méthodes classiques par la méthode du coefficient de réaction, mais comme une tentative de rendre cohérents entre eux les résultats des méthodes courantes de calcul.

Étude comparative des méthodes de calcul courantes

Généralités

Par rapport aux méthodes classiques, la méthode du coefficient de réaction introduit deux éléments qui jouent un rôle important dans le comportement de l'ouvrage. Ce sont les déformabilités de l'écran et du sol reflétées respectivement par le produit d'inertie EI du premier et le coefficient de réaction k_h du second, dont les valeurs déterminent dans une large mesure les efforts externes et internes appliqués à l'écran. Il faut cependant souligner que le concept de coefficient de réaction, qui vise à décrire au moyen d'un paramètre unique le comportement du sol en deçà de la rupture, ne donne qu'une image très grossière de ce comportement, qui est régi par des lois complexes. En outre, la détermination de ce coefficient fait l'objet de règles plus ou moins empiriques dont aucune n'est universellement acceptée. Il n'en reste pas moins que, si l'on tient compte de valeurs de k_h tirées de règles établies à partir de l'interprétation de mesures sur ouvrages, le calcul permet d'obtenir une estimation acceptable des sollicitations appliquées à un écran, sous réserve que ses conditions d'appui et sa flexibilité ne conduisent pas à la formation d'effets de voûte (Josseaume *et al.*, 1997). La méthode du coefficient de réaction constitue donc une méthode plus évoluée et plus souple d'utilisation que les méthodes classiques auxquelles elle est fréquemment substituée pour le calcul des écrans ancrés par tirants passifs.

C'est dans ce contexte que l'on a comparé, pour ce type d'ouvrages, les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations de prédimensionnement obtenues par les méthodes classiques,

le but recherché étant de définir les domaines respectifs d'application de ces dernières, c'est-à-dire les domaines où elles donnent sensiblement les mêmes résultats que le calcul aux coefficients de réaction.

Cette étude comparative constitue le prolongement de l'étude paramétrique dont il a été rendu compte antérieurement (Delattre *et al.*, 1996), qui avait pour objectif de comparer entre eux les résultats des méthodes classiques. Les données relatives à la géométrie et à l'environnement des rideaux de palplanches étudiés par le calcul aux coefficients de réaction ont, en effet, été sélectionnées parmi celles qui ont été prises en compte pour le calcul des écrans considérés dans l'étude paramétrique antérieure, dont les résultats ont servi de base au dimensionnement des rideaux.

La coupe d'un rideau ancré par une nappe de tirants passifs est représentée sur la figure 1 où sont également reportées les valeurs qui ont été affectées successivement à la hauteur libre h , à la profondeur h_t de la nappe de tirants, à la profondeur h_w des nappes amont et aval (situées au même niveau), à la surcharge q uniformément répartie sur le terre-plein arrière ainsi qu'à l'angle de frottement interne φ' du sol. Si l'on se réfère à l'étude paramétrique antérieure, qui prenait en compte les valeurs $q = 0, 20, 40$ et 60 kPa de la surcharge, on remarque que seules les valeurs extrêmes de q ont été retenues, ceci afin de limiter le nombre des calculs.

Les valeurs D de la fiche, M_p du moment fléchissant maximal et T_p de la réaction d'ancrage prises en compte pour le dimensionnement des rideaux ont été obtenues à partir :

- > des calculs en rideau encastré par la méthode de la ligne élastique,
- > des calculs en butée simple avec minoration *a priori* de 50 % de la butée limite, dont les résultats n'ont été affectés d'aucun coefficient minorateur,
- > des calculs en butée simple à l'équilibre limite avec majoration de 41 % de la fiche calculée,

qui ont été effectués lors de l'étude comparative des méthodes classiques. On rappelle, par ailleurs, que les

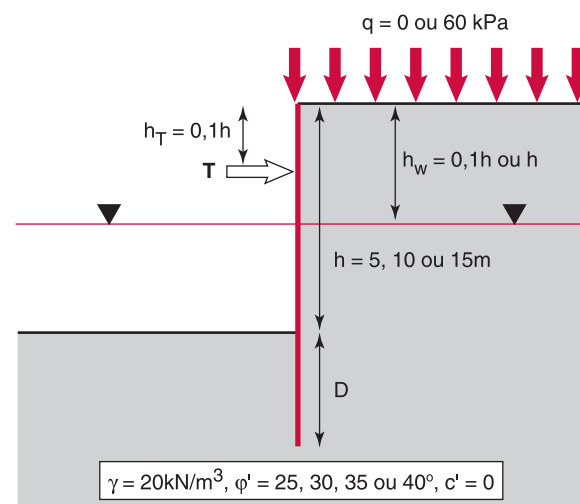


Fig. 1 - Caractéristiques des ouvrages étudiés.

contraintes limites de poussée et de butée prises en compte dans ces calculs ont été déterminées par la méthode de Boussinesq (au moyen des tables de Kérisel et Absi, 1990) en affectant à l'angle de frottement

sol-rideau δ les valeurs $\delta_a = +\frac{2}{3}\varphi'$ en poussée et

$\delta_p = -\frac{2}{3}\varphi'$ en butée.

Les palplanches constitutives des écrans ont été choisies parmi les palplanches profilées à froid de la série DWU et les palplanches profilées à chaud des séries U et Z (catalogue ARBED) de façon à ce que le taux de travail de l'acier ne dépasse pas les deux tiers de sa limite élastique. Dans les cas où plusieurs profils satisfaisaient à cette condition, on a sélectionné parmi ceux-ci le profil dont les caractéristiques, c'est-à-dire le module de résistance et la nuance d'acier, étaient telles que la différence entre le taux de travail admissible de l'acier et la contrainte maximale dans la section la plus sollicitée soit la plus faible. Les cas où aucun profil ne convenait (c'est-à-dire les cas où les sollicitations appliquées étaient telles que le recours à des caissons ou à des rideaux composites aurait été nécessaire) n'ont pas été retenus en raison du caractère exceptionnel des ouvrages.

Hypothèses des calculs aux coefficients de réaction

Les calculs aux coefficients de réaction des rideaux de palplanches dimensionnés par le calcul classique ont été effectués au moyen du logiciel DENEbola-LCPC (Balay et al., 1982 ; Delattre et al., 2000). L'excavation devant l'ouvrage, supposée réalisée en une seule étape, et l'application de la surcharge sur le terre-plein arrière ont été simulées par deux phases de calcul distinctes. On a considéré, par ailleurs, que :

- > l'écran est libre en tête et en pied ;
- > le coefficient de pression initiale du sol sur l'écran K_1 est égal au coefficient de pression du sol au repos K_0 ;
- > le comportement du sol en déchargement est réversible, c'est-à-dire que, lors d'un déchargement à déformation latérale nulle, la diminution $\Delta\sigma'_h$ de la contrainte horizontale due à une diminution $\Delta\sigma'_v$ de la contrainte verticale est telle que : $\Delta\sigma'_h = K_0\Delta\sigma'_v$.

La comparaison des résultats de ces calculs et des résultats des calculs classiques n'avait de sens que si des valeurs réalistes étaient affectées aux paramètres spécifiques au calcul au coefficient de réaction, c'est-à-dire aux coefficients de réaction k_h , au coefficient de pression du sol au repos K_0 et au coefficient de raideur K_t de l'appui élastique auquel est assimilé la nappe de tirants. En particulier, la valeur de K_t devait être telle que le déplacement du niveau d'ancrage soit compatible avec le développement d'un équilibre limite de poussée dans le massif arrière, sauf éventuellement en pied de rideau.

Les valeurs adoptées pour ces paramètres sont discutées ci-dessous.

■ Coefficient de réaction

Les valeurs du coefficient de réaction k_h ont été déterminées à partir de l'expression proposée par Ménard et al. (1964) pour le calcul de ce paramètre dans la partie en fiche :

$$\frac{1}{k_h} = \frac{1}{E_M} \left[\frac{a\alpha}{2} + 0,133(9a)^\alpha \right].$$

Le coefficient de réaction k_h a été supposé constant sur toute la hauteur du rideau et a été calculé en affectant au paramètre rhéologique α la valeur $\frac{1}{3}$ (applicable aux matériaux grenus) et au paramètre dimensionnel a la hauteur de fiche D .

Concernant la partie en fiche de l'écran, cette dernière hypothèse n'est légitime que dans le cas du rideau suffisamment rigide pour empêcher le développement d'une contre-butée. Elle a cependant été adoptée pour tous les écrans afin de limiter le nombre des calculs. En pratique, elle a pour effet de sous-estimer la valeur de k_h mobilisée dans la partie en fiche d'un rideau souple et, par suite, de surestimer la rigidité relative de celui-ci.

Concernant la partie libre de l'écran, la raideur de l'appui est choisie de telle sorte que l'état d'équilibre limite de poussée soit atteint au sein du massif soutenu. L'approximation faite, dans un souci de limitation des calculs, dans le choix du coefficient de réaction pour cette partie de l'écran, consistant à ne pas le distinguer du coefficient de réaction pris en fiche, n'a alors que peu d'influence sur les sollicitations calculées dans l'écran.

En ce qui concerne le choix du module pressiométrique, deux solutions pouvaient être envisagées *a priori* :

- > associer à chaque valeur de φ' une ou deux valeurs de E_M sélectionnées à partir de la compilation de rapports géotechniques où sont consignés à la fois des résultats d'essais pressiométriques et des résultats d'essais de résistance au cisaillement ;
- > associer à chaque valeur φ' une série de valeurs de E_M couvrant pratiquement le domaine de variation de ce paramètre lorsqu'il caractérise des sols grenus.

Compte tenu du fait que E_M et φ' ne peuvent être corrélés simplement entre eux, on a retenu la seconde solution. On a donc associé successivement à chaque valeur de φ' les cinq valeurs $E_M = 3,75, 7,5, 15, 30$ et 60 MPa du module pressiométrique.

■ Raideur du tirant

En ce qui concerne le choix de la valeur de la raideur K_t de l'appui élastique qui modélise la nappe des tirants, des calculs préliminaires, dont un exemple est présenté sur la figure 2, ont montré que :

➤ pour de faibles valeurs de K_t (inférieures à 1 000 kN/m), l'équilibre de l'écran nécessite le développement d'un important moment d'encastrement en fiche afin de compenser l'insuffisance de la réaction d'ancrage disponible aux faibles déplacements ;

➤ pour des valeurs de K_t comprises entre 1 000 et 5 000 kN/m, les moments fléchissants et la réaction d'ancrage sont peu sensibles aux variations de K_t ;

➤ pour des valeurs élevées de K_t (supérieures à 5 000 kN/m), le déplacement d'ancrage est non seulement incompatible avec le développement d'un équilibre limite de poussée à la partie supérieure du rideau, mais le recul de celui-ci au-dessus du point d'ancrage entraîne une mobilisation partielle de la butée en tête d'ouvrage. Il en résulte une augmentation de la réaction d'ancrage et du moment fléchissant au niveau de l'ancrage, qui se traduisent par une réduction (assez faible dans le domaine de variation considéré pour K_t) des moments fléchissants en travée et en fiche.

Afin de satisfaire à la condition de mobilisation d'un équilibre limite de poussée dans le massif arrière et afin de limiter les déplacements d'ancrage, on a affecté à K_t les plus fortes valeurs compatibles avec la mobilisation de la poussée limite sur toute la hauteur hors fiche. En pratique, et suivant les cas étudiés, on a adopté des valeurs de K_t comprises entre 1 000 et 5 000 kN/m.

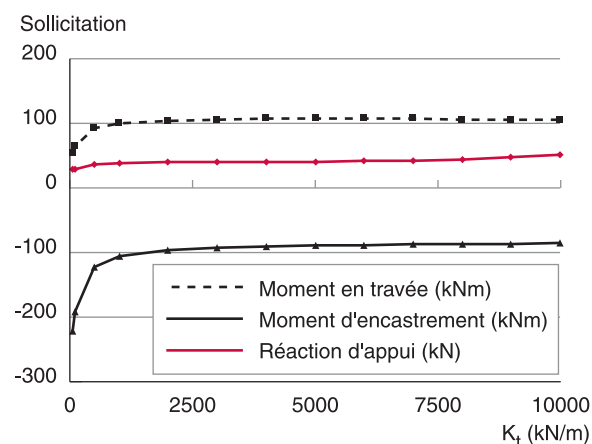


Fig. 2 - Variation des sollicitations calculées dans l'écran en fonction de la valeur donnée à K_t (résultats obtenus pour un ouvrage caractérisé par $\varphi' = 40$ degrés, $h = 10$ m, $D = 3,25$ m, $h_w = 0$, $q = 0$, $EI = 200\ 000$ kNm², $k_h = 6\ 925$ kN/m³).

■ Coefficient de pression du sol au repos

L'influence de la valeur de K_0 sur les résultats du calcul au coefficient de réaction a été étudiée dans le cas de deux écrans, l'un souple, l'autre rigide. Les calculs ont été effectués en tenant compte des valeurs de K_0 comprises entre la valeur K_0^{nc} relative à un sol normalement consolidé et la valeur $K_0 = 2$ qui caractérise un sol fortement surconsolidé.

K_0^{nc} a été évalué au moyen de la formule de Jaky :

$$K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi'$$

Ces calculs ont montré que, à l'intérieur de ce domaine de variation, la valeur prise par le coefficient K_t n'a que peu d'influence sur les sollicitations calculées dans l'écran (fig. 3).

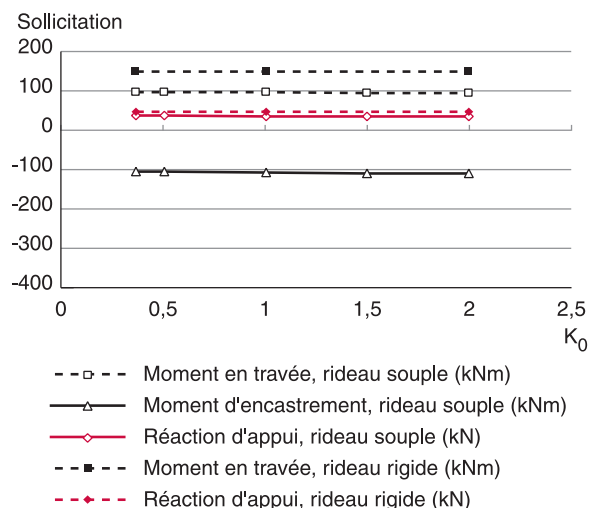


Fig. 3 - Variation des sollicitations calculées dans l'écran en fonction de la valeur prise par K_0 . Le rideau souple est caractérisé par $\varphi' = 40$ degrés, $h = 10$ m, $D = 3$ m, $h_w = 1$ m, $q = 0$, $EI = 14\ 112$ kNm², $k_h = 66\ 740$ kN/m³ ; le rideau rigide est caractérisé par $\varphi' = 40$ degrés, $h = 10$ m, $D = 1,26$ m, $h_w = 1$ m, $q = 0$, $EI = 14\ 112$ kNm², $k_h = 5\ 938$ kN/m³.

Résultats et interprétation des calculs aux coefficients de réaction

Compte tenu des objectifs de l'étude, on a déterminé, pour chaque ouvrage, les rapports des sollicitations (c'est-à-dire les rapports des moments fléchissants maximaux et le rapport des réactions d'ancrage) calculées, d'une part, par la méthode des coefficients de réaction et, d'autre part, par la méthode classique utilisée pour le dimensionnement, et on a tenté d'en dégager les lois de variation en fonction de variables qui caractérisent la rigidité relative du sol et des ouvrages. Le point de départ de la recherche de ces lois a été l'analyse des travaux théoriques de Rowe (1955) sur le comportement de rideaux ancrés de diverses flexibilités implantés en milieu pulvérulent.

Analyse des résultats sur la base des travaux de Rowe

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 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).

Rowe a exprimé les sollicitations ainsi calculées M_{CR} et T_{CR} en fonction des sollicitations de référence M_0 et T_0 , de la flexibilité du rideau et de paramètres adimensionnels $\alpha = \frac{h}{H}$, $\beta = \frac{h_t}{H}$ et $q_0 = \frac{q}{\gamma H}$:

➤ M_0 et T_0 sont les sollicitations calculées pour un écran de même configuration que l'écran étudié et chargé de façon identique en considérant que le diagramme de pression du sol sur la face avant est triangulaire (hypothèse d'un écran très rigide) ;

➤ la flexibilité relative de l'écran est définie par le produit de la raideur m du sol et de la flexibilité

$$\rho = \frac{H^4}{EI} \text{ de l'écran ;}$$

➤ $\alpha = \frac{h}{H}$, $\beta = \frac{h_t}{H}$ 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.

La variation des moments fléchissants réduits $\frac{M_{CR}}{M_0}$ en

fonction de $m \frac{H^4}{EI}$ sont représentées sur la figure 4 pour différentes valeurs de α , β et q_0 . Ces résultats ont permis à Rowe de constater que les paramètres qui jouent un rôle essentiel dans le comportement de l'écran sont sa flexibilité relative $m \frac{H^4}{EI}$ et le rapport α de sa hauteur libre et de hauteur totale, les autres paramètres n'ayant qu'une importance secondaire.

Ces conclusions peuvent être étendues au moins partiellement aux résultats de notre étude paramétrique. En effet, si l'on considère les courbes de variation des sollicitations réduites relatives aux rideaux dimensionnés en butée simple avec minoration forfaitaire de la butée en fonction de la flexibilité relative de ces ouvrages définie par l'expression $k_h \frac{H^4}{EI}$ (fig. 5), on constate que :

➤ le poids du paramètre α est sensiblement le même que dans la théorie de Rowe ;

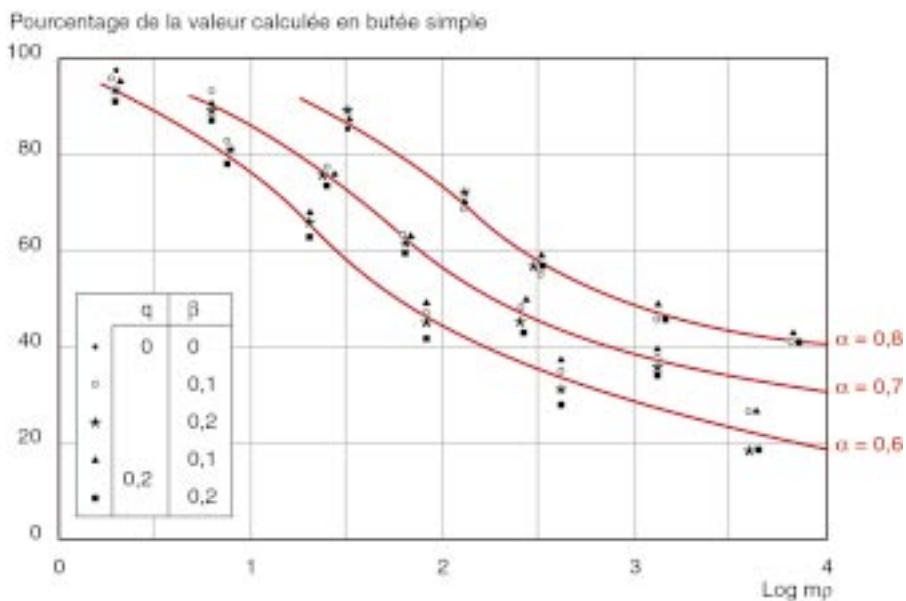


Fig. 4 - Réductions de moments fléchissants obtenues par Rowe (1955)*.

* Sur cette figure, ρ est exprimé en pied⁵/livre.pouce² et m est exprimé en livre/pied³. La conversion de Log mp en une grandeur sans unité s'obtient en ajoutant 2,2 aux valeurs lues en abscisse.

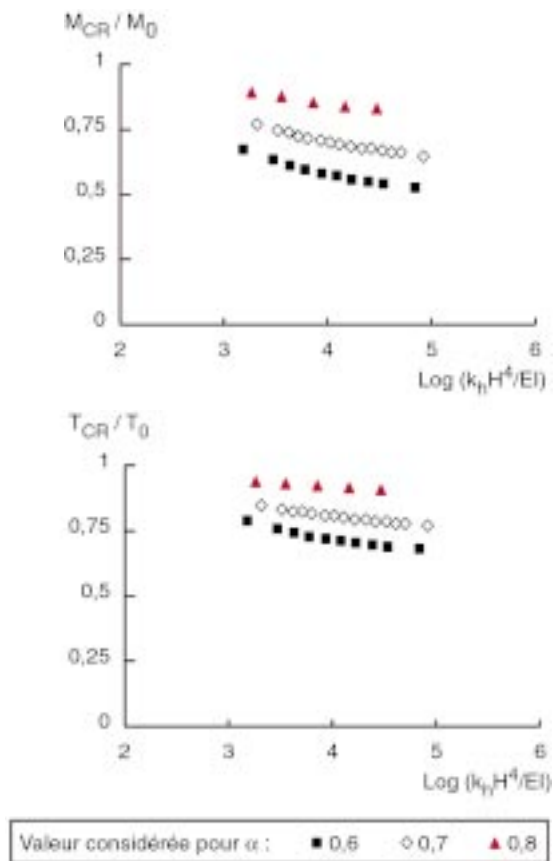


Fig. 5 - Sollicitations obtenues par le calcul au coefficient de réaction rapportées aux sollicitations obtenues en prédimensionnement par la méthode de la butée simple avec $F_B = 2$.

➤ cette dernière surestime fortement l'influence de la flexibilité relative.

Cette surestimation est due au fait que Rowe n'impose aucune limite aux contraintes que le sol exerce sur la face avant de l'écran et que, pour des valeurs élevées de m et de y (obtenues pour de faibles valeurs de EI), le calcul tient compte de réactions trop élevées et surestime ainsi l'encastrement du rideau en fiche.

L'introduction de la butée limite dans le modèle de calcul aux coefficients de réaction n'a pas pour unique conséquence de modifier la forme des courbes de réduction de Rowe. Elle fait aussi dépendre la réduction des sollicitations des possibilités de redistribution des contraintes sur la face avant de l'écran lors du passage du calcul en butée simple au calcul au coefficient de réaction. Ces possibilités de redistribution des contraintes sont d'autant plus grandes que l'écart entre le diagramme limite de butée et le diagramme de butée retenu pour le calcul en butée simple est plus important, c'est-à-dire que le coefficient de sécurité F_B sur la butée limite est plus élevé. Ceci est illustré par les résultats présentés sur la figure 6, obtenus pour des écrans caractérisés par $\alpha = 0,6$. On constate que les coefficients de réduction applicables aux valeurs de référence de la réaction d'ancrage sont plus faibles pour les rideaux dimensionnés avec $F_B = 2$ que pour ceux dimensionnés avec $F_B = 1,6$.

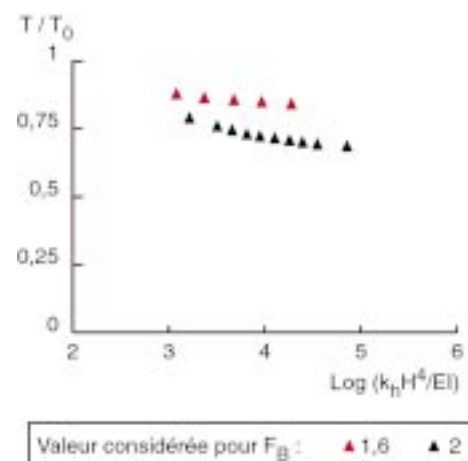


Fig. 6 - Réductions des réactions d'appui obtenues avec la méthode du coefficient de réaction pour des ouvrages dimensionnés par la méthode de la butée simple avec différentes valeurs de F_B .

Analyse des résultats par référence aux sollicitations à l'équilibre limite

Les recherches de Rowe ont établi que les sollicitations S appliquées à un écran de soutènement pouvaient être approchées par une relation de la forme :

$$S = iS_0$$

dans laquelle S_0 représente la sollicitation de référence définie comme la sollicitation appliquée à un écran parfaitement rigide de mêmes caractéristiques géométriques et chargé de façon identique, i étant un coefficient réducteur fonction de la géométrie de l'ouvrage et de sa flexibilité relative.

L'intérêt pratique de ce résultat est toutefois limité par le fait que, comme on l'a vu précédemment, le coefficient i de Rowe ne tient pas compte du degré de mobilisation de la butée en fiche, qui peut affecter sa valeur de façon déterminante. On a donc cherché à établir, à partir des résultats des calculs aux coefficients de réaction des ouvrages dimensionnés par les méthodes classiques, une relation de même forme qui fasse intervenir non seulement la flexibilité relative des ouvrages mais aussi leur situation par rapport à l'équilibre limite correspondant à la mobilisation complète de la butée.

Pour ce faire, on a adopté comme sollicitations de référence le moment fléchissant maximal M'_0 et la réaction d'ancrage T'_0 obtenus à partir d'un calcul en butée simple à l'équilibre limite ($F_B = 1$) et on a caractérisé la sécurité de l'ouvrage vis-à-vis de la rupture par défaut de fiche par le paramètre $\frac{D - D_0}{H}$ qui définit le supplément de fiche de l'ouvrage par rapport à la fiche D_0 à l'équilibre limite.

Par ailleurs, on a choisi d'exprimer la flexibilité relative des ouvrages en fonction de la longueur

$l_0 = 4\sqrt{\frac{EI}{k_h}}$ * qui caractérise la flexibilité de la partie en fiche en l'absence de mobilisation de la butée limite.

On obtient alors l'expression $k_h \frac{H^4}{EI} = \left(\frac{H}{l_0}\right)^4$ qui montre que la flexibilité relative d'un écran est une fonction croissante du rapport $\frac{H}{l_0}$. Ce rapport est donc un indice

de flexibilité, son inverse, plus commode d'utilisation, étant un indice de rigidité.

* Cette expression de la longueur de transfert permet de faire coïncider la puissance quatrième du rapport H/l_0 avec le produit m défini par Rowe. Elle diffère d'un facteur 4 de l'expression qui dérive de la résolution de l'équation d'équilibre d'une poutre sur appui élastique continu.

On a donc tracé, pour tous les rideaux dimensionnés par les méthodes classiques, les variations des rapports des sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction (M_{CR} et T_{CR}) et des sollicitations de références correspondantes (M'_0 et T'_0) en fonction de $\frac{D - D_0}{H}$, d'une part, et de $\frac{l_0}{H}$, d'autre part.

L'examen des diagrammes de la figure 7, qui présentent ces variations, montre que les deux paramètres $\frac{D - D_0}{H}$ et $\frac{l_0}{H}$ permettent d'interpréter celles-ci dans leurs grandes lignes :

➤ pour des fiches proches de la fiche à l'équilibre limite ($\frac{D - D_0}{H}$ faible), les sollicitations tendent naturellement vers les sollicitations de référence ;

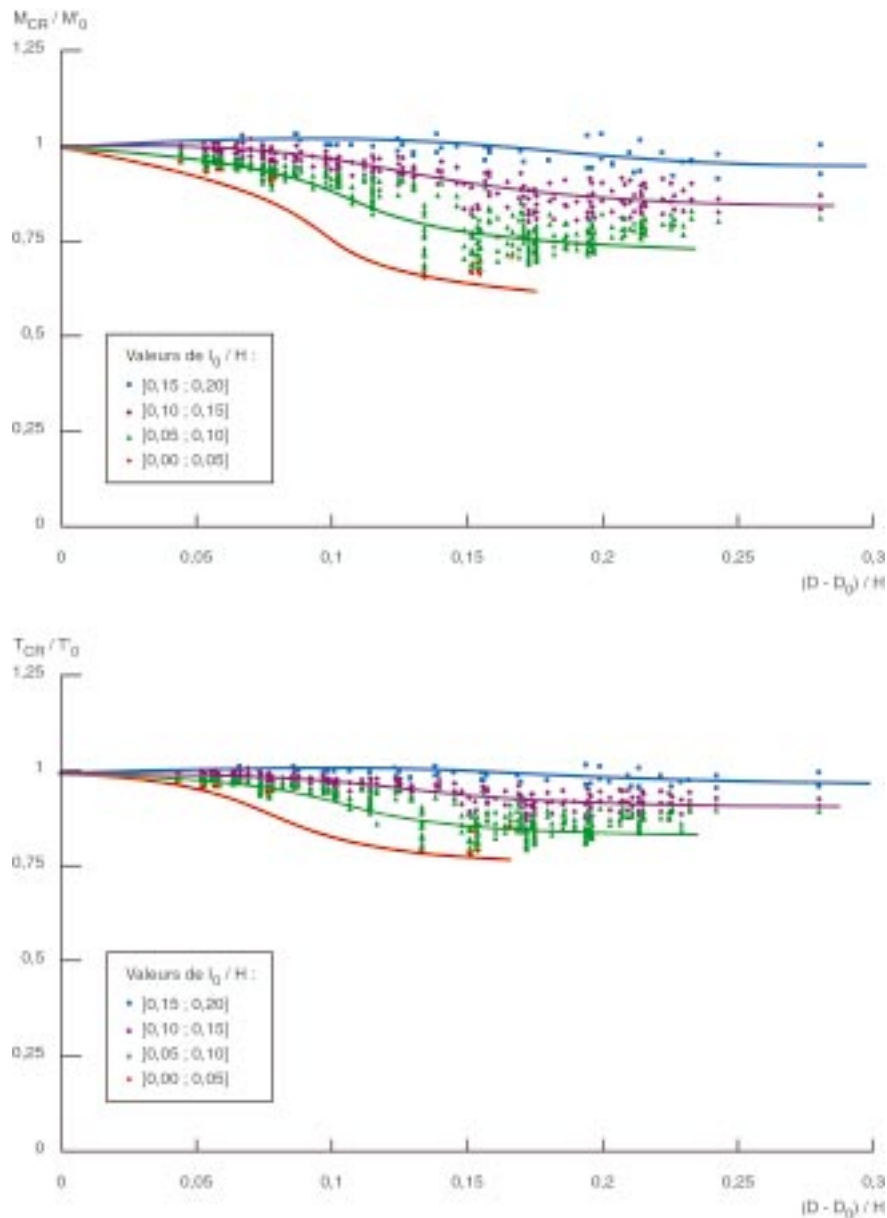
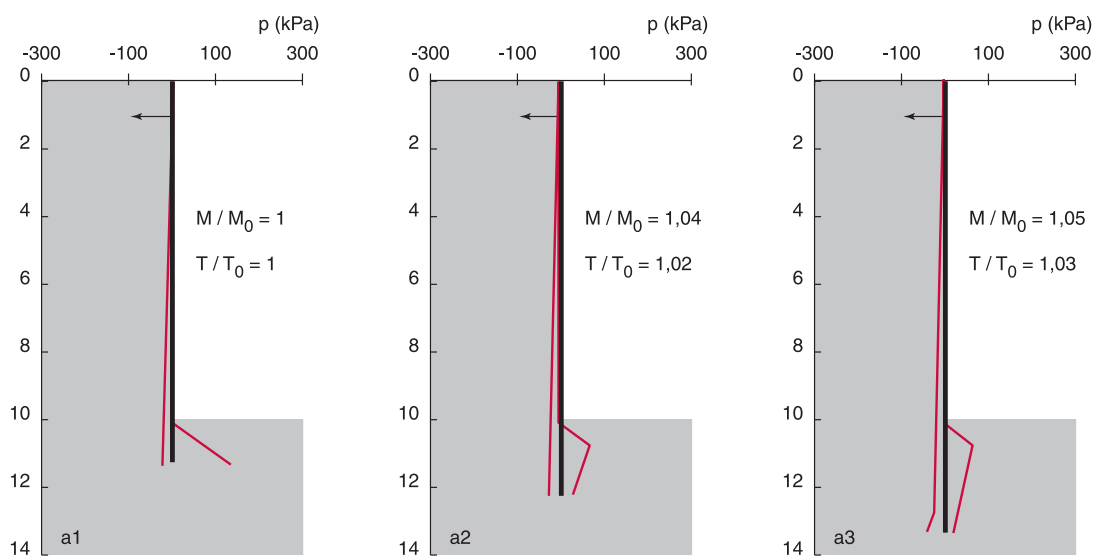


Fig. 7 - Sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction rapportées aux sollicitations calculées à l'équilibre limite de défaut de fiche.

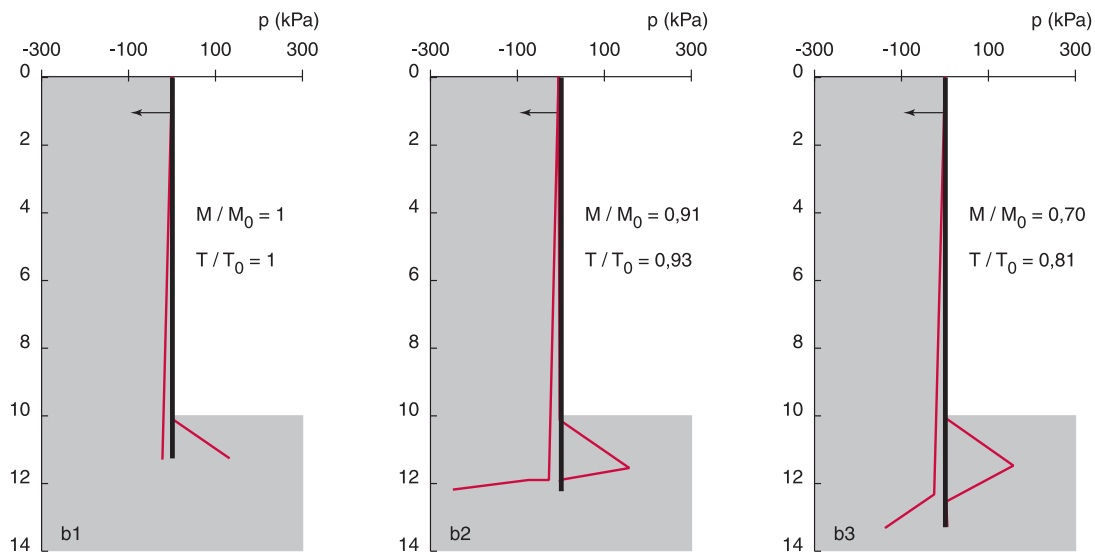
- pour les écrans les plus rigides et pour de faibles suppléments de fiche, on observe tout d'abord une faible augmentation des sollicitations ; celles-ci passent par un maximum et évoluent vers des valeurs inférieures aux valeurs de référence lorsque le supplément de fiche continue de croître ;
- pour les écrans les plus souples, les sollicitations sont des fonctions constamment décroissantes de $\frac{D - D_0}{H}$ et semblent se stabiliser pour des valeurs de ce paramètre d'autant plus faibles que le rideau est plus flexible ;
- les sollicitations appliquées à des écrans ayant le même supplément de fiche varient, dans l'ensemble (voir ci-après), en raison inverse de l'indice de rigidité.

Les répartitions des pressions sur l'écran obtenues dans deux cas typiques (fig. 8) permettent d'interpréter ces résultats.

Pour un écran relativement rigide (caractérisé par $\frac{l_0}{H} = 0,175$), on observe que l'accroissement de fiche conduit dans un premier temps ($\frac{D - D_0}{H} = 0,07$) à répartir la butée nécessaire à l'équilibre de l'écran sur la hauteur de la fiche. Cette répartition des pressions se traduit par un abaissement de la résultante de la butée et donc par un accroissement des sollicitations dans l'écran par rapport à la situation de référence (équilibre limite). Un accroissement supplémentaire de la fiche



a. Écran rigide caractérisé par $l_0/H = 0,175$.



b. Écran souple caractérisé par $l_0/H = 0,075$.

1) - $D = D_0$; 2) - $\frac{D - D_0}{H} = 0,07$; 3) - $\frac{D - D_0}{H} = 0,15$.

Fig. 8 - Distribution des pressions effectives du sol sur l'écran (écran caractérisé par une hauteur libre de 10 m, un angle de frottement du sol de 40 degrés, une nappe haute, et une surcharge nulle).

$\left(\frac{D-D_0}{H} = 0,15\right)$ conduit à la mobilisation d'une contre-butée. L'augmentation de cette contre-butée se traduira par un moment d'encastrement venant réduire les sollicitations dans l'écran.

Pour un écran souple (caractérisé par $\frac{l_0}{H} = 0,075$), l'accroissement de fiche conduit d'emblée $\left(\frac{D-D_0}{H} = 0,07\right)$ à la mobilisation d'une contre-butée et donc à l'apparition d'un moment d'encastrement venant réduire les sollicitations dans l'écran par rapport à la situation de référence.

Ce comportement permet d'expliquer comment interviennent les deux facteurs considérés dans l'analyse :

> le facteur $\frac{l_0}{H}$, en combinant le facteur $\frac{H^4}{EI}$ de déformation propre de l'écran sous l'action d'un chargement unitaire et le terme k_h de mobilisation de la réaction du sol, constitue un indice de la mobilisation du sol devant l'écran. Il traduit donc correctement ce comportement en écran rigide et en écran souple : un écran rigide va mobiliser faiblement les pressions de sol en butée, la contrepartie nécessaire étant une répartition de ces contraintes sur une hauteur importante de la fiche, tandis qu'un écran souple mobilisera plus largement les pressions en butée, avec pour conséquence une apparition plus rapide de la contre-butée ;

> le terme $\frac{D-D_0}{H}$, pour une famille d'écrans caractérisée par une valeur donnée de $\frac{l_0}{H}$, contrôle l'apparition, puis le développement du moment d'encastrement dû à la contre-butée.

■ Remarque

Une étude détaillée de la figure 7 montre toutefois que les résultats obtenus pour les différents intervalles de variation de $\frac{l_0}{H}$ ne sont pas complètement distincts. Ainsi, par exemple, des réductions de sollicitations plus fortes peuvent être obtenues pour $\frac{l_0}{H} > 0,10$ que pour $\frac{l_0}{H} < 0,10$, contrairement à la tendance générale.

Ce phénomène est par ailleurs d'autant plus marqué que les valeurs prises par $\frac{l_0}{H}$ sont faibles, c'est-à-dire que l'ouvrage considéré est plus souple. On est donc conduit à penser que, si le rapport $\frac{S_{CR}}{S_0}$ élimine l'essentiel des particularités du chargement propre à chacun des cas de calcul, il n'est pas totalement indépendant de celles-ci et leur influence est d'autant plus sensible que le compor-

tement de l'écran s'éloigne du comportement de l'écran de référence (écran simplement buté). Cette influence semble toutefois rester faible pour les ouvrages étudiés.

Comparaison des sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations calculées en prédimensionnement avec les méthodes classiques

La recherche de relations entre les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction et les sollicitations de prédimensionnement calculées par les méthodes classiques tient compte des résultats des études précédentes, qui mettent en évidence la sensibilité du calcul au coefficient de réaction à la flexibilité du rideau et à l'importance relative de la fiche et de la hauteur totale de l'écran.

On a donc cherché à corréler le rapport des sollicitations déterminées respectivement par la méthode du coefficient de réaction et par le calcul classique (sollicitation de prédimensionnement) à l'indice de flexibilité $\frac{l_0}{H}$ du rideau et au pourcentage de fiche défini par $\frac{D}{H}$ (le paramètre $\frac{D-D_0}{H}$ considéré précédemment n'a pas été retenu car les sollicitations S_{CR} ne sont plus rapportées aux sollicitations S'_0 calculées à l'équilibre limite de défaut de fiche mais aux sollicitations de prédimensionnement S_p^*).

L'analyse des différentes corrélations qui ont été testées a montré que les résultats les meilleurs sont obtenus en considérant non pas le pourcentage de fiche $\frac{D}{H}$ mais le pourcentage de fiche nette $\frac{D-e}{H}$, e étant la profondeur du point de pression nulle sous le fond de fouille. Il est en outre apparu que les deux paramètres $\frac{l_0}{H}$ et $\frac{D-e}{H}$ pouvaient être contractés en un seul par élimination de la hauteur totale H de l'ouvrage. On constate en effet (fig. 9) que, dans le cas des écrans prédimensionnés par la méthode de la ligne élastique, d'une part, et de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche, d'autre part, le rapport $\frac{S_{CR}}{S_p}$ dépend presque exclusivement du paramètre $\frac{D-e}{l_0}$ quelles que soient les conditions de chargement des ouvrages (angle de frottement du sol, niveau de nappe, etc.).

* Les sollicitations S_p calculées en prédimensionnement par les méthodes classiques ne coïncident avec les sollicitations S_0 à l'équilibre limite que pour les écrans prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche.

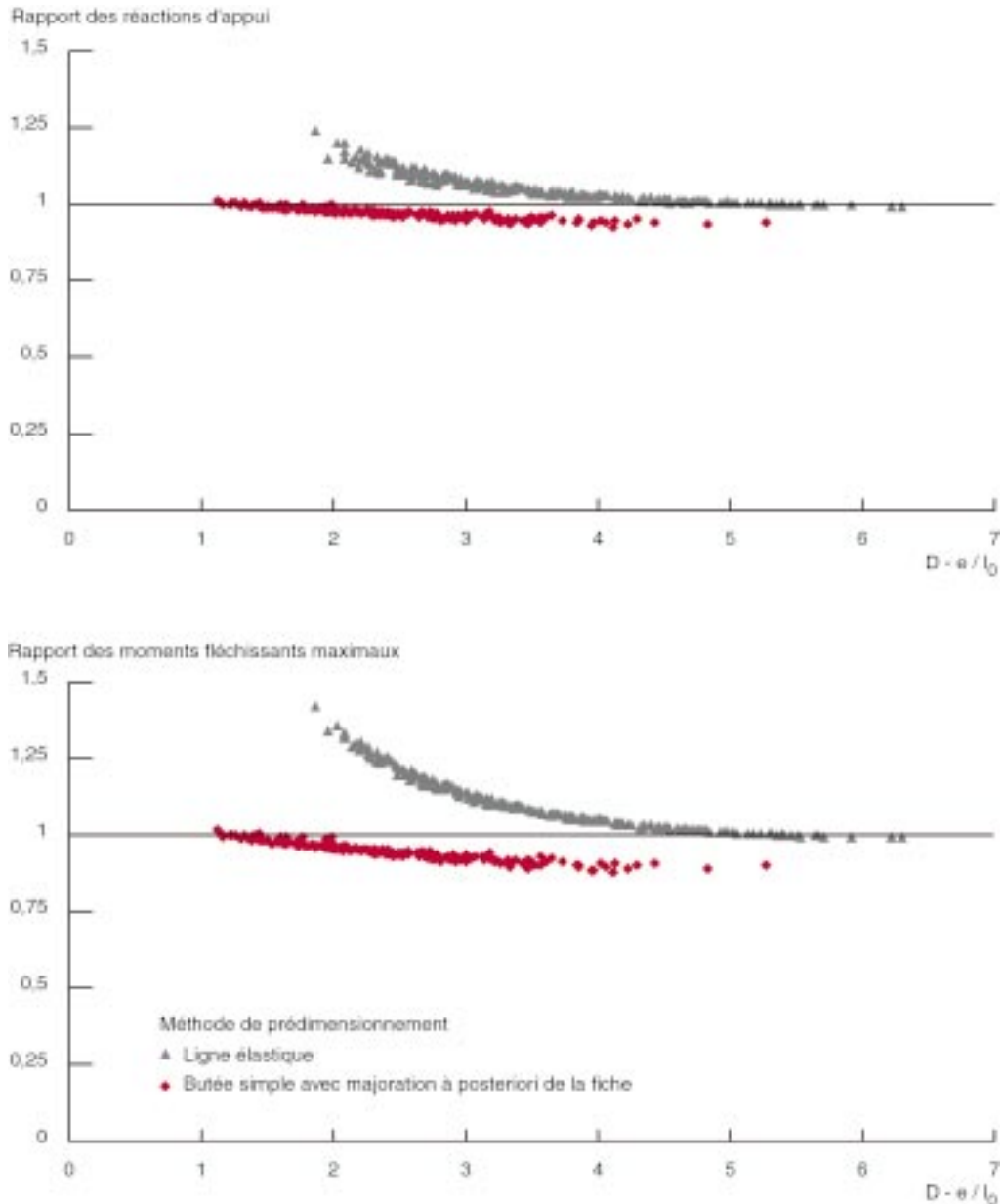


Fig. 9 - Rapport des sollicitations déterminées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations déterminées en prédimensionnement par les méthodes classiques.

Ouvrages prédimensionnés par la méthode de la ligne élastique

Les courbes de la figure 9 montrent que les sollicitations S_{CR} déterminées par le calcul au coefficient de réaction coïncident parfaitement avec les sollicitations de prédimensionnement S_p calculées par la méthode de la ligne élastique dans le cas des ouvrages caractérisés par une forte valeur de $\frac{D-e}{l_0}$, mais qu'elles augmentent rapidement par rapport à ces dernières lorsque $\frac{D-e}{l_0}$ devient inférieur à une valeur de l'ordre de 4,5.

Le rapport $\frac{M_{CR}}{M_p}$ des valeurs maximales des moments

fléchissants*) prend alors des valeurs largement supérieures au rapport $\frac{T_{CR}}{T_p}$ des valeurs des réactions d'appui. C'est ainsi que, dans le cas d'un écran dimensionné par la méthode de la ligne élastique et caractérisé par $\frac{D-e}{l_0} = 2$, le calcul au coefficient de réaction

* Pour les écrans prédimensionnés par la méthode de la ligne élastique, on représente non pas les rapports des moments maximaux mais les rapports des moments maximaux en travée ; le moment en fiche devient prépondérant, dans le calcul en ligne élastique, pour les douze écrans les moins chargés et, dans le calcul au coefficient de réaction, pour quatre écrans seulement (combinant chargement faible et coefficient de réaction élevé).

donne des moments fléchissants maximaux supérieurs d'environ 40 % et des réactions d'ancrage supérieures d'environ 25 %.

Les diagrammes de pression du sol obtenus par la méthode du coefficient de réaction pour trois écrans caractérisés respectivement par les valeurs 2,52, 3,56 et

5,03 de $\frac{D-e}{l_0}$ (fig. 10b, 10c, et 10d, respectivement)

montrent que le comportement d'un ouvrage est d'autant plus proche de celui d'un rideau encastré (forte mobilisation de la butée au voisinage du fond de fouille, développement d'une contre-butée importante), justifiable du calcul par la méthode de la ligne élastique

(fig. 10a), que $\frac{D-e}{l_0}$ est plus élevé. Le paramètre

$\frac{D-e}{l_0}$ caractérise donc le « taux d'encastrement » de

l'ouvrage et permet de préciser le domaine d'emploi de la méthode de la ligne élastique. Les courbes de la figure 9 montrent qu'un ouvrage est effectivement encastré si ce taux d'encastrement est supérieur à 4,5. Une conséquence pratique de ce résultat consisterait à recommander de vérifier, à l'issue du dimensionnement d'un ouvrage par la méthode de la ligne élastique,

que le paramètre $\frac{D-e}{l_0}$ est bien supérieur à une valeur

seuil de 3,5. Le sous-dimensionnement relatif dû à la méthode de la ligne élastique, par rapport à la méthode du coefficient de réaction, reste alors inférieur à 10 %.

Ouvrages prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche

Les courbes de la figure 9 montrent que les sollicitations calculées en prédimensionnement par cette méthode restent, pour tous les ouvrages étudiés, relativement proches des sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction. Ainsi, pour tous les ouvrages étudiés, le calcul par la méthode du coeffi-

cient de réaction ne conduit pas à reconsidérer de façon majeure les sollicitations déterminées lors du prédimensionnement.

On observe que les rapports des sollicitations $\frac{S_{CR}}{S_p}$ ne

dépendent pratiquement que du facteur $\frac{D-e}{l_0}$. Cette

dépendance est caractérisée par une diminution quasiment linéaire, de faible pente, des rapports $\frac{S_{CR}}{S_p}$ en

fonction de $\frac{D-e}{l_0}$, ces rapports de sollicitations prenant

la valeur unité pour une valeur de $\frac{D-e}{l_0}$ égale à 1,5 environ :

➤ $\frac{M_{CR}}{M_p}$ décroît d'une valeur maximale égale à 1,03

pour $\frac{D-e}{l_0} = 1$ à une valeur minimale égale à 0,89

pour $\frac{D-e}{l_0} = 4,5$,

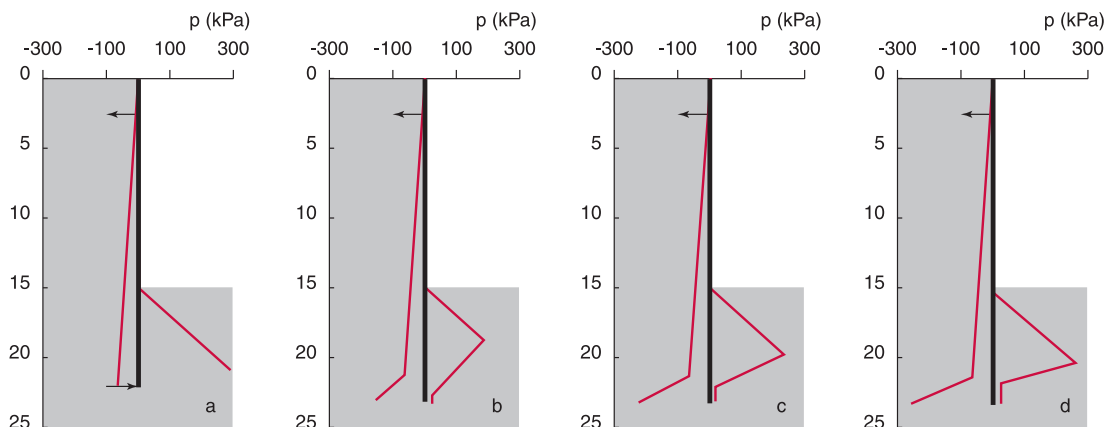
➤ $\frac{T_{CR}}{T_p}$ décroît d'une valeur maximale égale à 1,02

pour $\frac{D-e}{l_0} = 1$ à une valeur minimale égale à 0,93

pour $\frac{D-e}{l_0} = 4,5$.

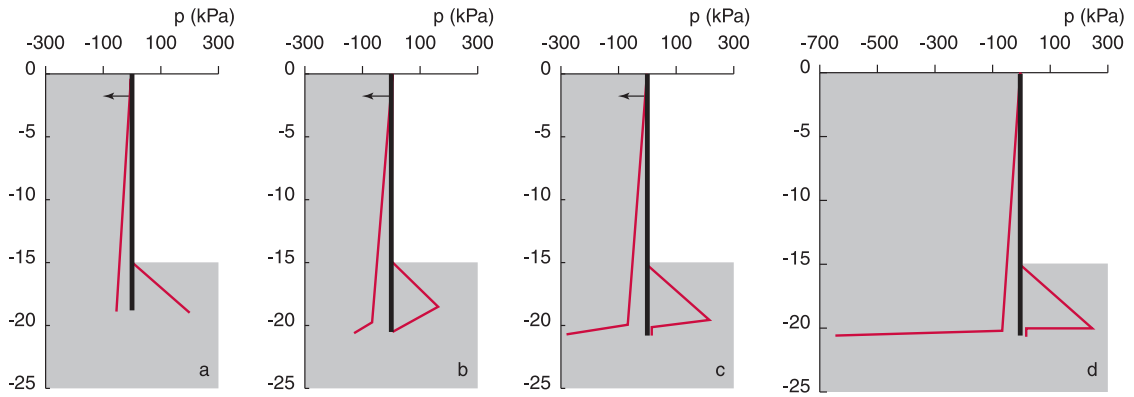
Les distributions de pression obtenues par la méthode du coefficient de réaction pour trois ouvrages caractérisés respectivement par les valeurs 1,65, 2,34 et 3,31 de $\frac{D-e}{l_0}$ (fig. 11) permettent d'interpréter ces résultats.

Pour $\frac{D-e}{l_0} = 1,65$, la rigidité de l'écran est telle



a. Prédimensionnement (méthode de la ligne élastique). b. Calcul au coefficient de réaction avec $k_h = 1\,992\text{ kN/m}^3$. c. Idem avec $k_h = 7\,969\text{ kN/m}^3$. d. Idem avec $k_h = 31\,867\text{ kN/m}^3$.

Fig. 10 - Distribution des pressions effectives du sol sur l'écran (écran caractérisé par $h = 15\text{ m}$, $\varphi' = 30\text{ degrés}$, $h_w = 0,1\text{ h}$, $q = 0$, $D = 7,98\text{ m}$, $EI = 118\,650\text{ kNm}^2$).



a. Prédimensionnement (méthode de la butée simple avec majoration a posteriori de la fiche). b. Calcul au coefficient de réaction avec $k_h = 2\,641\text{ kN/m}^3$. c. Idem avec $k_h = 10\,565\text{ kN/m}^3$. d. Idem avec $k_h = 42\,261\text{ kN/m}^3$.

Fig. 11 - Distribution des pressions effectives du sol sur l'écran (écran caractérisé par $h = 15\text{ m}$, $\varphi' = 30\text{ degrés}$, $h_w = 0,1\text{ h}$, $q = 0$, $D = 5,58\text{ m}$, $EI = 155\,232\text{ kNm}^2$).

que le sol est en état d'équilibre limite de butée au-dessus du niveau correspondant à la fiche d'équilibre limite, tandis qu'au-dessous de ce niveau, la mobilisation du sol en butée diminue et se trouve compensée par une faible contrebutée mobilisée en arrière de l'écran. Les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction sont donc proches des sollicitations de l'équilibre limite.

La valeur de $\frac{D-e}{l_0}$ croissant, l'utilisation de la méthode du coefficient de réaction conduit à la mobilisation d'une contre-butée plus forte que les pressions mobilisées devant l'écran en partie inférieure de la fiche, ce qui se traduit par l'apparition d'un moment d'encastrement venant réduire les sollicitations par rapport à l'estimation qui en est faite avec la méthode de la butée simple.

A contrario, $\frac{D-e}{l_0}$ prenant des valeurs inférieures à 1,5, la mobilisation de pression sur la hauteur de la fiche doit diminuer, la butée se répartissant sur toute la hauteur de la fiche ; le comportement de l'écran tend à devenir le comportement d'un écran rigide. En conséquence, la méthode du coefficient de réaction conduit à des sollicitations tendant à devenir supérieures aux sollicitations calculées en prédimensionnement.

D'un point de vue pratique, ces résultats montrent que, pour un ouvrage dont la fiche est dimensionnée par la méthode de la butée simple avec majoration a posteriori de la fiche, l'utilisation de la méthode du coefficient de réaction pour l'estimation des sollicitations ne conduit pas à des sollicitations très différentes de celles déterminées à l'équilibre limite de défaut de fiche.

Le calcul du « taux d'encastrement » de l'écran $\frac{D-e}{l_0}$ peut être utilisé pour donner une indication de la surestimation relative des sollicitations calculées en pré-

dimensionnement par rapport aux sollicitations qui seraient obtenues en vérification par la méthode du coefficient de réaction. Si ce « taux d'encastrement » prend une valeur trop importante (supérieure à 3,5) on pourra préférer prédimensionner l'ouvrage par la méthode de la ligne élastique.

Ouvrages prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec minoration a priori de la butée

À la différence des résultats trouvés pour les ouvrages prédimensionnés par la méthode de la ligne élastique et par la méthode de la butée simple avec majoration a posteriori de la fiche, les rapports de sollicitation $\frac{S_{CR}}{S_p}$

ne sont plus simplement corrélés à $\frac{D-e}{l_0}$. On est conduit à adopter, pour les valeurs de $\frac{S_{CR}}{S_p}$, une présentation faisant appel aux variables $\frac{D-e}{l_0}$ et $\frac{e}{h}$ (fig. 12).

Cette figure montre que les rapports $\frac{S_{CR}}{S_p}$ sont compris entre 0,5 et 1 et prennent des valeurs d'autant plus faibles que $\frac{D-e}{l_0}$ et $\frac{e}{h}$ prennent des valeurs fortes. Ces résultats confirment donc que le prédimensionnement d'un écran en rideau infiniment rigide, hypothèse de base de la méthode de la butée simple avec minoration a priori de la butée, peut conduire à une surestimation relativement importante des sollicitations par rapport à la méthode du coefficient de réaction. Cette surestimation est d'autant plus importante que l'ouvrage est fortement chargé, c'est-à-dire caractérisé par de fortes valeurs de $\frac{e}{h}$ (Delattre et al. 1996), et qu'il est plus

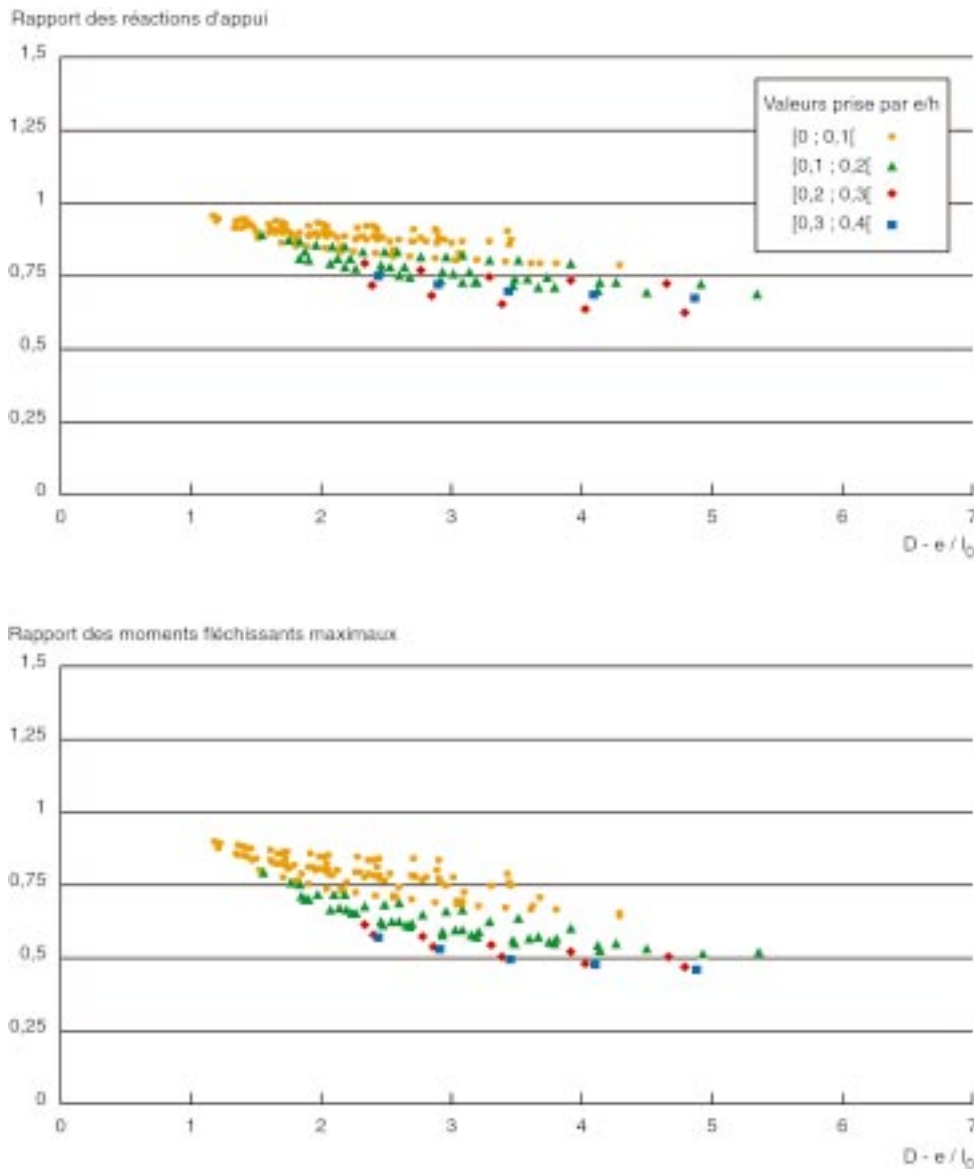


Fig. 12 - Rapport des sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations calculées en prédimensionnement par la méthode de la butée simple avec minoration a priori de la butée de 50 %.

souple, c'est à dire que le taux d'encastrement $\frac{D-e}{l_0}$ est plus grand.

De façon pratique, il convient donc de limiter l'usage de cette méthode de calcul des sollicitations à des ouvrages présentant des valeurs de l'indice de charge-

ment $\frac{e}{h}$ inférieures à 5 à 10 % et des valeurs de l'indice de flexibilité $\frac{D-e}{l_0}$ inférieures à 2 à 3.

Ouvrages prédimensionnés par la méthode mixte de Padfield et Mair (1984)

La méthode mixte de Padfield et Mair consiste à retenir, pour le dimensionnement de l'ouvrage, la fiche calculée par la méthode de la butée simple avec minoration a priori de la butée et les sollicitations calculées à

l'équilibre limite de défaut de fiche par la méthode de la butée simple avec majoration a posteriori de la fiche.

Le calcul par la méthode du coefficient de réaction d'ouvrages ainsi dimensionnés n'a pas été mené. Si l'on

ne dispose donc pas des valeurs des rapports $\frac{S_{CR}}{S_p}$ entre

les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction et les sollicitations calculées en prédimensionnement par cette méthode, les résultats trouvés précédemment pour chacune des deux méthodes de butée simple permettent de donner un encadrement des valeurs prises par ce rapport. En effet, cette méthode mixte de prédimensionnement conduit à retenir pour l'écran une inertie plus faible que celle retenue par la méthode de butée simple avec minoration a priori de la butée tandis que la fiche reste identique. Dans ces conditions, les diagrammes de la figure 7 montrent que les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de

réaction pour les ouvrages prédimensionnés par la méthode mixte de Padfield et Mair sont toujours inférieures aux sollicitations calculées pour les ouvrages prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec minoration *a priori* de la butée, l'écart entre les sollicitations correspondantes étant d'autant plus grand que la différence entre les valeurs de $\frac{l_0}{H}$ caractérisant les dimensionnements respectifs est grande.

La figure 13 montre que la différence entre les valeurs de $\frac{l_0}{H}$ caractérisant des ouvrages prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec minoration *a priori* de la butée et les valeurs de $\frac{l_0}{H}$ caractérisant des ouvrages prédimensionnés par la méthode mixte de Padfield et Mair ne dépasse généralement pas 0,05.

On peut donc déduire de la figure 7 que les sollicitations $S_{CR(BS2)}$ constituent des évaluations légèrement

par excès des sollicitations $S_{CR(BSm)}$. Le rapport $\frac{S_{CR(BSm)}}{S_{p(BSm)}}$ est donc légèrement majoré, de façon sys-

tématique par le rapport $\frac{S_{CR(BS2)}}{S_{p(BSm)}}$, soit encore par le

rapport $\frac{S_{CR(BS2)}}{S_{p(BS1)}}$, puisque $S_{p(BSm)} = S_{p(BS1)}$ *.

Ces valeurs des rapports $\frac{S_{CR(BS2)}}{S_{p(BS1)}}$ ont été portées sur

la figure 14 en fonction des valeurs correspondantes de

* Dans ces expressions, « BS1 » fait référence à la méthode de la butée simple sans minoration de la butée « BS2 », fait référence à la méthode de la butée simple avec minoration préalable de 50 % de la butée et « BSm » fait référence à la méthode mixte de la butée simple de Padfield et Mair.

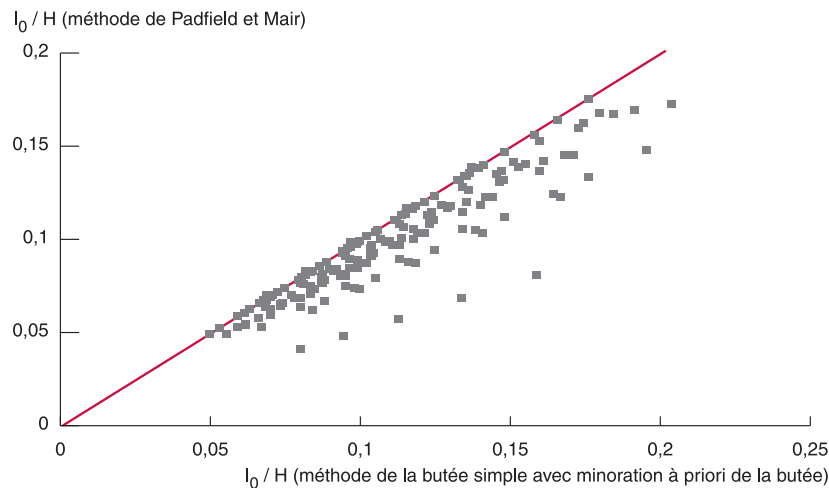


Fig. 13 - Comparaison des valeurs prises par l_0/H pour des ouvrages prédimensionnés en butée simple avec minoration *a priori* de la butée et pour des ouvrages prédimensionnés par la méthode mixte de Padfield et Mair.

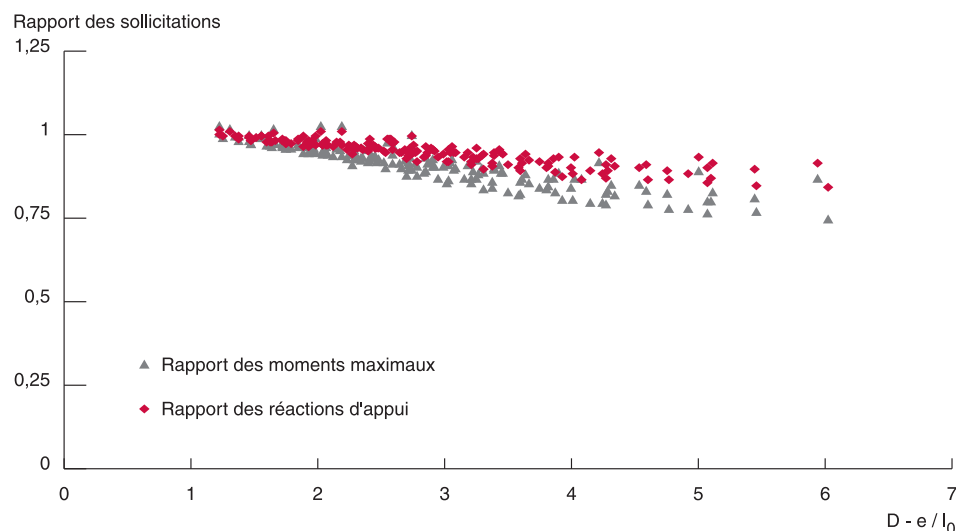


Fig. 14 - Majorants des rapports des sollicitations déterminées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations déterminées en prédimensionnement par la méthode mixte de Padfield et Mair.

$\frac{D-e}{l_0}$. Cette figure montre que la méthode de Padfield et Mair donne une estimation des sollicitations dans l'ouvrage voisine de l'estimation faite par la méthode du coefficient de réaction pour des ouvrages caractérisés par $\frac{D-e}{l_0} < 2$ mais qu'elle tend à surestimer les sollicitations pour $\frac{D-e}{l_0} > 2$.

Conclusions

L'étude paramétrique par la méthode du coefficient de réaction du comportement d'écrans de soutènement prédimensionnés par les méthodes classiques a permis de dégager un certain nombre de résultats originaux relatifs au comportement des écrans simplement ancrés en tête.

■ Un premier ensemble de résultats

porte sur le rôle joué par la flexibilité de l'écran sur son comportement. Après avoir souligné les insuffisances de la méthode de Rowe de prise en compte de la flexibilité des écrans pour l'analyse de leur comportement, une nouvelle méthode est proposée. Cette méthode consiste à adjoindre au quantificateur retenu par Rowe de la flexibilité de l'écran dans le sol un deuxième quantificateur portant sur la surlongueur relative de fiche que présente l'ouvrage par rapport à la fiche correspondant à l'équilibre limite.

L'expression proposée par Rowe pour quantifier la flexibilité relative de l'écran est modifiée et cette flexibilité relative est mise sous la forme du rapport d'une « longueur de transfert » l_0 des efforts dans le sol à la hauteur totale H de l'écran. La longueur de transfert est

prise égale à $l_0 = 4 \sqrt{\frac{EI}{k_h}}$ où EI désigne le produit d'inertie de l'écran et k_h le coefficient de réaction du sol. Le quantificateur de la surlongueur de fiche que présente l'ouvrage par rapport à la fiche calculée à l'équilibre limite est, pour sa part, exprimé sous la forme $\frac{D-D_0}{H}$, où H désigne la hauteur de l'écran, D sa fiche et D_0 la fiche calculée à l'équilibre limite.

L'utilisation combinée de ces deux quantificateurs permet d'analyser les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction par référence aux sollicitations calculées à l'équilibre limite (méthode de la butée simple sans minoration de la butée). Ainsi, le rapport $\frac{S_{CR}}{S_0}$ des sollicitations calculées la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations calculées à l'équilibre limite tend vers 1 lorsque le rapport $\frac{l_0}{H}$ est

de l'ordre de 0,2, et ceci indépendamment de la surlongueur relative de la fiche $\frac{D-D_0}{H}$.

La flexibilité de l'écran augmentant (le rapport $\frac{l_0}{H}$ diminuant), la sensibilité du rapport $\frac{S_{CR}}{S_0}$ des sollicitations à la surlongueur relative de la fiche augmente : pour des fiches proches de la fiche correspondant à l'équilibre limite, les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction restent voisines des sollicitations calculées à l'équilibre limite ; la fiche de l'ouvrage augmentant par rapport à la fiche correspondant à l'équilibre limite, la réduction des sollicitations est d'autant plus forte que l'écran est flexible dans le sol, c'est à dire que le rapport $\frac{l_0}{H}$ est faible.

■ Le second ensemble de résultats

porte sur la comparaison des sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations calculées en prédimensionnement par les méthodes classiques.

Les résultats obtenus montrent que le rapport des sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations calculées en prédimensionnement ne dépend plus que du rapport $\frac{D-e}{l_0}$ de la fiche

nette de l'écran à la longueur de transfert des efforts dans le sol, ceci pour les ouvrages prédimensionnés par la méthode de la ligne élastique ou par la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche.

On observe ainsi que la méthode du coefficient de réaction donne des résultats sensiblement égaux aux résultats obtenus en prédimensionnement par la méthode de la ligne élastique lorsque ce rapport $\frac{D-e}{l_0}$ reste supérieur à 4,5. Pour des valeurs de ce rapport inférieures à 4,5, la méthode de la ligne élastique tend à sous-estimer les sollicitations par rapport à la méthode du coefficient de réaction.

Concernant les ouvrages prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche, le phénomène observé est inverse.

Pour des valeurs de $\frac{D-e}{l_0}$ inférieures à 2, les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction sont sensiblement égales aux sollicitations calculées en prédimensionnement. Le rapport $\frac{D-e}{l_0}$ augmentant, la méthode de butée simple tend à surestimer les efforts par rapport à la méthode du coefficient de réaction.

Concernant les ouvrages prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec minoration *a priori* de la butée, il apparaît que les sollicitations calculées en

prédimensionnement sont toujours notablement supérieures aux sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction. Le rapport $\frac{D-e}{l_0}$ ne suffit toutefois plus à expliquer les valeurs prises par le rapport des sollicitations et il est nécessaire de considérer également le rapport $\frac{e}{h}$ caractérisant le chargement de l'écran (Delattre et al., 1996). La combinaison de ces deux caractéristiques de l'ouvrage permet de montrer que la méthode de prédimensionnement surestime d'autant plus les sollicitations, par rapport à la méthode du coefficient de réaction, que l'écran est fortement chargé et que le rapport $\frac{D-e}{l_0}$ est élevé.

Enfin, une évaluation du rapport des sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction aux sollicitations calculées par la méthode mixte de Padfield et Mair a été obtenue. Il apparaît que ces rapports de sollicitations s'apparentent assez bien aux rapports de sollicitations qui caractérisent les ouvrages prédimensionnés par la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche. Ainsi, pour des valeurs de $\frac{D-e}{l_0}$ inférieures à 2, les sollicitations calculées par la méthode du coefficient de réaction sont sensiblement égales aux sollicitations calculées en prédimensionnement. Le rapport $\frac{D-e}{l_0}$ augmentant, la méthode de Padfield et Mair tend à surestimer les efforts par rapport à la méthode du coefficient de réaction.

■ Domaine d'emploi des méthodes classiques

Ces résultats relatifs à la flexibilité de l'ouvrage complètent ceux obtenus sur la sécurité en fiche des ouvrages par Delattre et al. (1996) quant au domaine d'utilisation des méthodes classique de calcul des soutènements simplement ancrés :

- le domaine d'emploi de la méthode de la ligne élastique se limite ainsi aux ouvrages caractérisés par un rapport $\frac{D-e}{l_0}$ supérieur à 3,5 ;
- le domaine d'emploi de la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche se limite, pour sa part, aux ouvrages caractérisés, d'une part, par un rapport $\frac{D-e}{l_0}$ inférieur à 3,5, d'autre part, par un rapport $\frac{e}{h}$ inférieur à 0,1, ce dernier critère visant à préserver un coefficient de sécurité de 2 en fiche (Delattre et al. 1996) ;
- lorsque l'ouvrage est caractérisé par un rapport $\frac{D-e}{l_0}$ inférieur à 3,5 et par un rapport $\frac{e}{h}$ supérieur à 0,1, la méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche ne garantit plus une sécurité suffisante en fiche et il est préférable de faire appel à la méthode mixte de Padfield et Mair (1984) ; la fiche de l'ouvrage est alors calculé par la méthode de la butée simple avec minoration *a priori* de la butée tandis que les sollicitations sont calculées à l'équilibre limite (méthode de la butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

DELATTRE L., JOSSEAUME H., MESPOULHE L., DELMER T. (1996), Comparaison des méthodes classiques des écrans de soutènement ancrés, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **205**, pp. 77-90.

DELATTRE L., MESPOULHE L., GORSE J.-F. (2000), Dénébola : une nouvelle interface utilisateur et un nouveau mode de diffusion, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **226**, pp. 89-92.

HALIBURTON T.A. (1968), Numerical analysis of flexible retaining structures, Proc. ASCE, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 94, **SM6**, pp. 1233-1251.

JOSSEAUME H., DELATTRE L., MESPOULHE L. (1997), Interprétation par le calcul au coefficient de réaction du comportement du rideau de palplanches expérimental de Hochstetten, *Revue Française de Géotechnique*, **79**, pp. 59-72.

KERISEL J., ABSI E. (1990), *Tables de poussée et de butée des terres*, Presses des Ponts et Chaussées, 240 pages.

MENARD L., BOURDON G., HOUY A. (1964), Étude expérimentale de l'encastrement d'un rideau en fonction des caractéristiques pressiométriques du sol de fondation, *Sols-Soils*, Vol. 3, **9**, pp. 11-27.

PADFIELD C.J., MAIR R.J. (1984), *Design of retaining walls embedded in stiff clay*, Londres : CIRIA, Rapport 104, 1984, 146 pages.

ROWE P.W. (1955), *A theoretical and experimental analysis of sheet-pile walls*, Proc. Instn Civ. Engrs, Pt I, Vol. 4, pp. 32-69.

Notations

- > **h** : hauteur libre du rideau.
- > **h_w** : profondeur de la nappe, comptée sous le niveau du terre-plein.
- > **h_t** : profondeur des ancrages, comptée sous le niveau du terre-plein.
- > **k_r** : coefficient de réaction.
- > **l₀** : longueur de transfert.
- > **q** : surcharge uniforme sur le terre-plein.
- > **D** : profondeur en fiche du rideau.
- > **D₀** : fiche limite, calculée en butée simple sans minoration de la butée.
- > **EI** : produit d'inertie de l'écran.
- > **F_B** : coefficient de sécurité en fiche (butée mobilisable rapportée à la butée mobilisée dans l'hypothèse d'un comportement simplement buté).
- > **H** : hauteur totale de l'écran.
- > **K₀** : coefficient de pression des terres au repos.
- > **K_i** : coefficient de pression initiale du sol sur l'écran.
- > **K_t** : raideur de la nappe d'ancrage.
- > **M₀** : moment fléchissant maximal calculé dans l'hypothèse d'un comportement infiniment rigide, sur la base d'une répartition triangulaire des contraintes en butée.
- > **M'₀** : moment fléchissant maximal à l'état d'équilibre limite de défaut de fiche, calculé par la méthode de la butée simple sans minoration de la butée.
- > **M_p** : moment fléchissant maximal calculé en prédimensionnement par une méthode classique.
- > **M_{CR}** : moment fléchissant maximal calculé par la méthode du coefficient de réaction.
- > **S₀** : sollicitation calculée dans l'hypothèse d'un comportement rigide, sur la base d'une répartition triangulaire des contraintes en butée.
- > **S'₀** : sollicitation à l'état d'équilibre limite de défaut de fiche, calculée par la méthode de butée simple sans minoration de la butée.
- > **S_p** : sollicitation calculée en prédimensionnement par une méthode classique.
- > **S_{CR}** : sollicitation calculée par la méthode du coefficient de réaction.
- > **T₀** : réaction d'appui calculée dans l'hypothèse d'un comportement infiniment rigide, sur la base d'une répartition triangulaire des contraintes en butée.
- > **T'₀** : réaction d'appui à l'état d'équilibre limite de défaut de fiche, calculée par la méthode de la butée simple sans minoration de la butée.
- > **T_p** : réaction d'appui calculée en prédimensionnement par une méthode classique.
- > **T_{CR}** : réaction d'appui calculée par la méthode du coefficient de réaction.

ABSTRACT

Flexibility and design of tie-back retaining walls

L. DELATTRE, H. JOSSEAUME, L. MESPOULHE, T. DELMER

This paper presents the results of a parametric study using the subgrade reaction method of the performance of tied-back sheetpile walls constructed in frictional soil.

The first part of the paper deals with the flexibility of sheetpile walls and describes a new method for taking this into account after pointing out the shortcomings of the method proposed by Rowe. This new method substitutes the performance of the wall at the ultimate equilibrium of embedment failure for the rigid wall behaviour considered by Rowe in order to analyse the flexibility of the wall. With this new approach, the stresses within the wall are estimated by taking into account both the flexibility of the wall and the additional embedment of the wall as compared with the embedment that corresponds to the ultimate equilibrium.

The second part of the study compares the stresses calculated by the subgrade reaction method with those calculated for preliminary design purposes using conventional methods. The ratio between these stresses is solely determined by the flexibility of the embedment and, in the case of walls whose preliminary design is based on the free earth support method used with a reduced passive pressure, on the loading of the wall. The stresses calculated using the subgrade reaction method are similar to those calculated in preliminary design work using the fixed earth method for flexible walls and the free earth support method applied with no reduction of passive pressure for more rigid walls. In all cases, when used with a reduced passive pressure, the free earth support method leads to considerably higher calculated stresses in the wall as compared with the subgrade reaction method.