

Étude du comportement de pieux forés

II. Modélisation par éléments finis

Marilza das NEVES

Docteur ENPC
Maître de conférence
Université de São Paulo (Brésil)

Philippe MESTAT

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

Roger FRANK

Directeur
Centre d'Enseignement et de recherche en mécanique des sols
LCPC/ENPC

Éric DEGNY

Ingénieur des Travaux publics de l'État
Chef de la section Informatique-recherche
Service Informatique
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Des essais en vraie grandeur sur des pieux en traction et en compression ont été modélisés à l'aide du progiciel de calcul par éléments finis CÉSAR-LCPC. Deux modèles ont été utilisés pour représenter le comportement du sol : un modèle élastique parfaitement plastique (Mohr-Coulomb) et un modèle élastoplastique avec écrouissage (Nova, 1982). Pour reproduire le comportement d'interface sol-pieu, des éléments de contact et un critère de frottement de Coulomb ont été employés. Après un recalage sur les valeurs des paramètres de frottement, la comparaison des résultats numériques avec les mesures devient acceptable pour les courbes charge-déplacement vertical en tête. En revanche, les distributions des efforts calculés le long du pieu ne sont pas en accord avec les mesures. La loi de frottement utilisée est trop simple pour décrire les variations réelles du frottement latéral. Des améliorations devront être apportées pour perfectionner les modèles de calcul de pieux et représenter l'ensemble du fonctionnement de l'interaction sol-structures.

MOTS CLÉS : 42 - *Éléments finis (méthode) - Comportement - Sol - Pieu - Frottement - Modèle mathématique - Traction - Compression - Béton coulé sur place - Logiciel.*

Introduction

Dans le cadre d'une recherche commune menée par le LCPC et l'École d'ingénieurs de São Carlos de l'université de São Paulo (Brésil), des simulations du comportement expérimental de pieux forés isolés ont été réalisées. Un article précédent a présenté les résultats expérimentaux (pieux de différents diamètres soumis à des charges axiales de traction et de compression), la caractérisation des couches de sol à partir d'essais de laboratoire et *in situ*, et les valeurs des paramètres mécaniques pour deux modèles de comportement (modèle de Mohr-Coulomb et modèle de Nova, version 1982).

L'ensemble de ces résultats permet d'envisager une modélisation numérique des six essais effectués : un essai de traction et un essai de compression pour trois diamètres de pieux différents (0,35 ; 0,40 et 0,50 m). La modélisation est effectuée à l'aide du progiciel d'éléments finis CÉSAR-LCPC et du module de calcul TCNL, qui résout des problèmes de contact entre des matériaux élastoplastiques. Les résultats numériques obtenus (courbes charge-déplacement et distribution des efforts le long du fût) sont ensuite comparés aux mesures disponibles.

Modélisation des pieux expérimentaux

Maillages

Comme les pieux étudiés sont cylindriques de section circulaire, isolés et chargés axialement, la modélisation peut être réalisée en symétrie de révolution, dans un plan méridien. La discrétisation du sol et du béton est effectuée à l'aide d'éléments quadrangulaires à huit nœuds. Les interfaces sol-structures (base et fût des pieux) sont décrites par des éléments de contact à six nœuds.

Les dimensions des maillages sont choisies de manière à ce que la frontière latérale soit distante de $60 r_0$ de l'axe de symétrie (r_0 est le rayon du pieu), et la frontière inférieure située à une longueur ℓ de la pointe du pieu (ℓ est la longueur du pieu). Les conditions aux limites appliquées sont alors les suivantes (fig. 1) :

- déplacements horizontaux nuls sur la frontière latérale (segment AB) et sur l'axe de symétrie (segment OC) ;
- déplacements verticaux nuls sur la frontière inférieure (segment BC).

Pour chaque diamètre de pieu, deux maillages ont été élaborés : l'un relativement grossier et l'autre plus raffiné, avec une bonne finesse autour des interfaces (pointe et fût des pieux). L'idée était

d'optimiser les nombres d'éléments et de nœuds de manière à pouvoir effectuer aisément des analyses paramétriques. Le tableau I présente les caractéristiques des six maillages auxquels on a abouti pour les différents diamètres de pieux. Pour un même diamètre, le modèle est identique pour les études en traction et en compression. Les figures 1a et 1b montrent respectivement un maillage grossier et un maillage raffiné pour le pieu de diamètre 0,40 m (Neves, 1993).

Modèles de comportement et paramètres de calcul

Plusieurs analyses ont été menées de manière à étudier la représentativité des modèles de comportement des différentes couches de sol. Celles-ci ont été successivement décrites par un modèle élastoplastique parfait (critère de Mohr-Coulomb) et un modèle élastoplastique avec écrouissage (modèle de Nova, version 1982). Les valeurs des paramètres ont été déterminées dans un article précédent (Neves et al., 2001) ; les tableaux II à IV résument les valeurs finalement retenues, après recalage sur les résultats d'essais de laboratoire (pour les sols) et *in situ* (pour le béton des pieux).

Les valeurs du coefficient de Poisson et du poids volumique du béton ont été fixées à des valeurs habituelles : $\nu = 0,3$ et $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$.

TABLEAU I
Caractéristiques des maillages d'éléments finis

Maillage d'éléments finis	D = 0,35 m		D = 0,40 m		D = 0,50 m	
	nombre d'éléments	nombre de nœuds	nombre d'éléments	nombre de nœuds	nombre d'éléments	nombre de nœuds
grossier	70	242	70	242	81	277
raffiné	508	1 606	536	1 692	598	1 882

D : diamètre du pieu.

TABLEAU II
Valeurs des paramètres du modèle de Mohr-Coulomb

Paramètre	Profondeur de prélèvement (m)			
	0 à 6,3	6,3 à 8,3	8,3 à 11	11 à 20,6
E (kPa)	9 150	13 510	13 570	19 300
ν	0,12	0,12	0,07	0,05
c' (kPa)	13	12	14	17
φ' (degrés)	26	23	23	23
ψ (degrés)	0	0	0	0
γ' (kN/m ³)	16,7	18,8	19,8	10,0
K_0	0,56	0,61	0,61	0,61

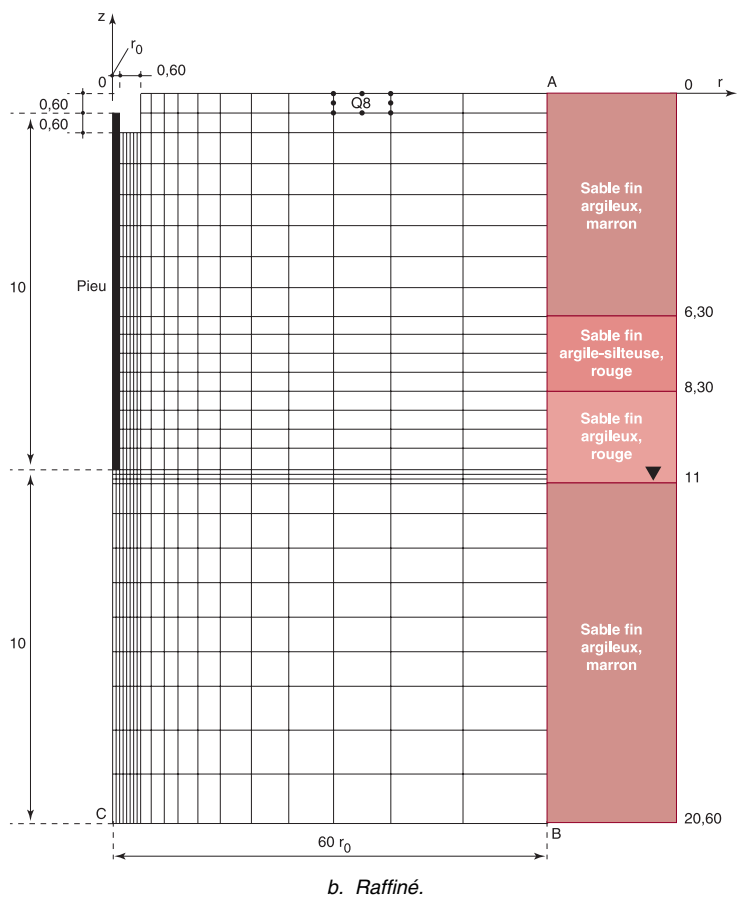
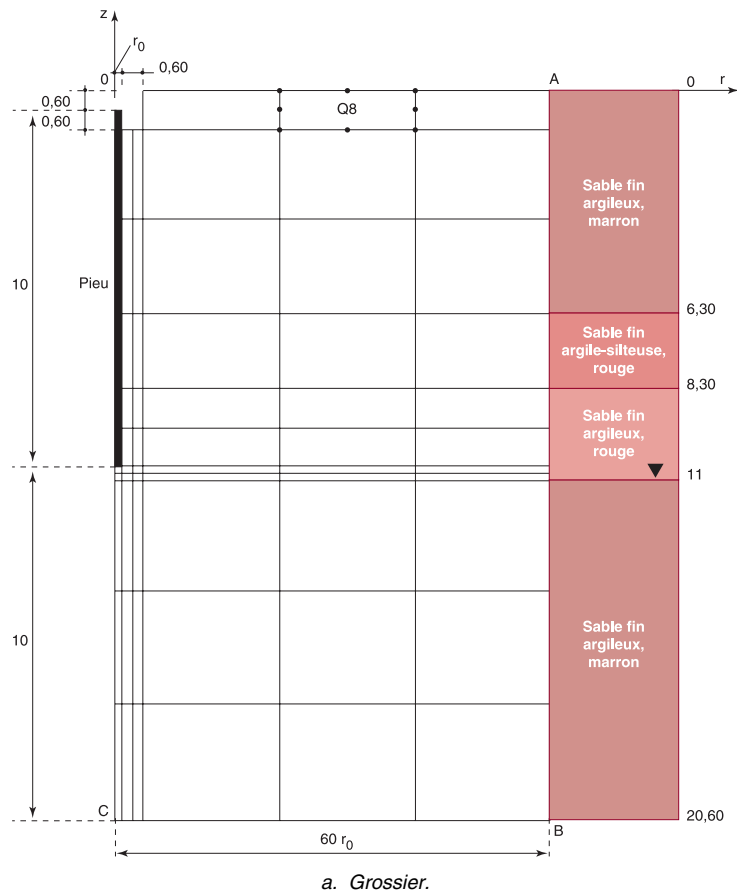


Fig. 1 - Maillage d'éléments finis pour le pieu de diamètre 0,40 mètre.

TABLEAU III
Valeurs des paramètres du modèle de Nova (version 1982)

Paramètre	Profondeur de prélèvement (m)			
	0 à 6,3	6,3 à 8,3	8,3 à 11	11 à 20,6
M	1,45	1,16	1,13	1,11
ℓ	0,0124	0,0168	0,0200	0,0294
B_0	0,0017	0,0102	0,0114	0,0168
L_0	0,0061	0,0083	0,0082	0,0114
μ	1	1	1	1
D	0	0	0	0
P_{co} (kPa)	98	146	203	302
m	0,45	0,5	0,6	0,6
E (kPa)	9 150	13 510	13 570	19 300
ν	0,12	0,12	0,07	0,05
γ' (kN/m ³)	16,7	18,8	19,8	10
K_0	0,56	0,61	0,61	0,61

TABLEAU IV
Modules d'Young du béton pour les pieux
en traction et en compression

Diamètre du pieu (m)	Traction (MPa)	Compression (MPa)
0,35	17 300	29 900
0,40	18 800	29 200
0,50	17 000	25 400

Comportement d'interface

Le comportement d'interface est simulé par une loi de frottement de Coulomb, qui utilise trois paramètres : une cohésion d'interface (c'_c), un angle de frottement (φ'_c) et un angle de dilatance (ψ). Ne disposant pas de résultats d'essais caractérisant l'interaction sol-structure, on a supposé dans un premier temps que les valeurs des paramètres au contact sol-pieu sont les mêmes que celles attribuées au modèle de Mohr-Coulomb pour la couche de sol correspondante. L'angle de dilatance est supposé égal à zéro.

Cette loi rend également possible le décollement des points pour lesquels la contrainte normale dépasse un certain seuil de résistance à la traction (R_T). Cette valeur est prise égale à 20 kPa pour les essais de compression, afin d'éviter certains problèmes numériques liés à des décollements-recollements. Pour les essais de traction, la valeur vaut zéro.

Maillages grossiers ou maillages raffinés ?

La comparaison des résultats obtenus avec les maillages grossiers et raffinés a démontré que, pour un modèle élastoplastique parfait, les courbes charge-déplacement étaient très proches, tant pour les essais de compression que pour ceux de traction. La figure 2 illustre ces comparaisons dans le cas des pieux de diamètre 0,35 m. Cette bonne concordance justifie l'emploi des maillages grossiers pour les modèles de Mohr-Coulomb. Le gain en temps de calcul est alors très appréciable. En revanche, pour le modèle de Nova, il a été nécessaire d'employer les maillages raffinés car les différences avec les résultats fournis par les maillages grossiers étaient trop importantes (Neves, 1993).

État initial et lois de chargement

La mise en place des pieux par forage conduit nécessairement à un remaniement du sol autour des pieux. Celui-ci est très difficile à estimer expérimentalement et à simuler numériquement. Aussi, l'installation des pieux a été modélisée par une étape de chargement initial dans laquelle sont appliqués le poids volumique du pieu et celui des différentes couches de sol. Il s'ensuit un certain état de contraintes (dans le sol et aux interfaces) et un champ de déplacements dû à la gravité. Ces déplacements sont ensuite annulés et l'état de contraintes initial obtenu introduit dans l'étape de chargement de la tête des pieux.

Les calculs sont effectués de manière incrémentale en appliquant progressivement les charges de

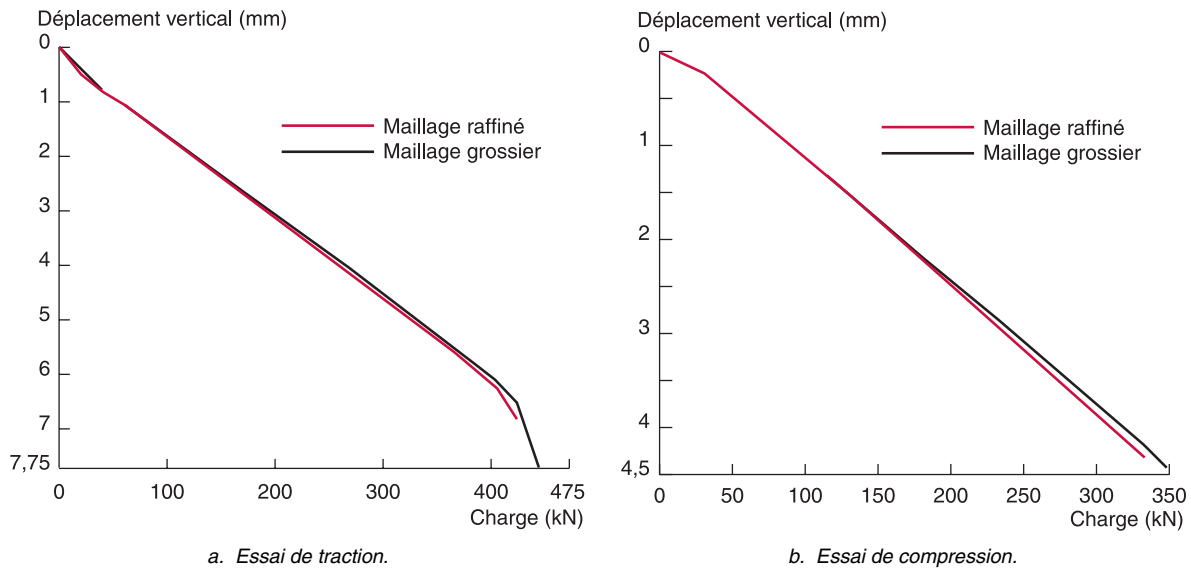


Fig 2 - Courbes charge-déplacement en tête du pieu de diamètre 0,35 mètre.
 Comparaison des résultats obtenus avec les maillages grossier et raffiné pour le modèle de Mohr-Coulomb.

traction ou de compression jusqu'à obtenir une divergence du processus de résolution itératif ou des difficultés de convergence liées à l'apparition de grands déplacements pour de faibles accroissements du chargement. Le plus souvent, les calculs sont menés jusqu'à l'apparition d'un palier de glissement. Le palier d'écoulement plastique n'a jamais été atteint dans cette étude.

Comparaison des courbes charge-déplacement théorique et expérimentale

L'analyse des courbes charge-déplacement montre qu'il n'existe pas une bonne concordance entre les

courbes théorique et expérimentale. Dans la plupart des cas, la réponse théorique conduit à un comportement globalement linéaire (fig. 3 à 5). Pour le modèle de Mohr-Coulomb, les valeurs des paramètres de résistance sont telles que la plastification ne débute que pour une charge supérieure de 15 % à la « charge ultime expérimentale » ; la réponse du modèle demeure dans le domaine élastique.

Pour le modèle de Nova, il en est un peu de même ; la plasticité avec écrouissage est sous-estimée. On peut noter néanmoins une assez bonne simulation pour le pieu de diamètre 0,40 m en compression (fig. 4b).

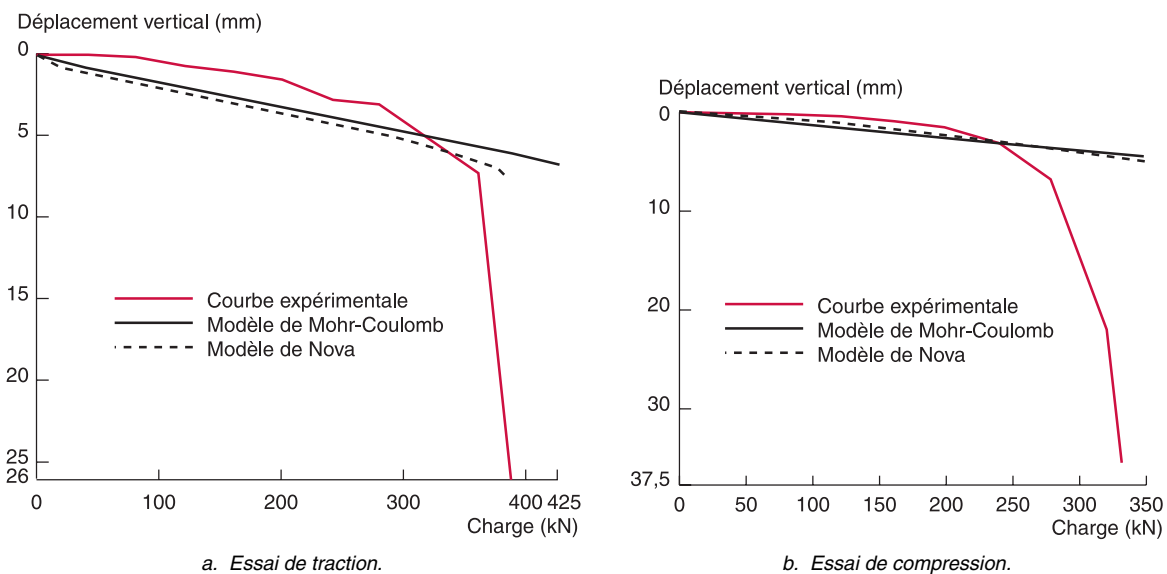


Fig. 3 - Comparaison des courbes charge-déplacement théorique et expérimentale pour le pieu de diamètre 0,35 mètre.

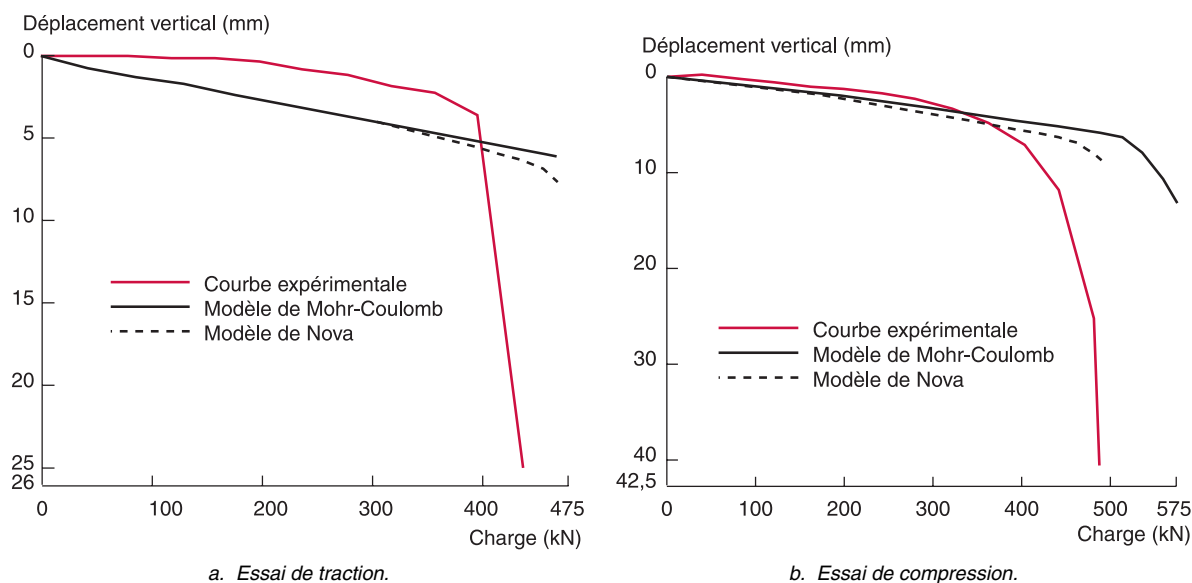


Fig. 4 - Comparaison des courbes charge-déplacement théorique et expérimentale pour le pieu de diamètre 0,40 mètre.

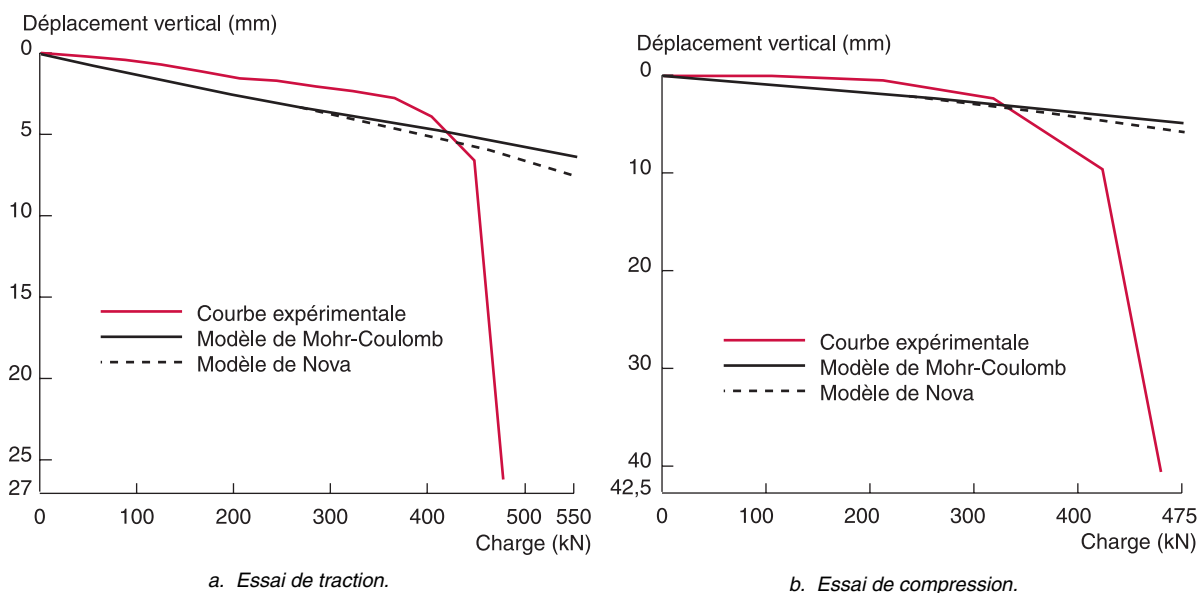


Fig. 5 - Comparaison des courbes charge-déplacement théorique et expérimentale pour le pieu de diamètre 0,50 mètre.

La conclusion immédiate serait que la modélisation numérique n'est pas bonne. Mais, il ne faut pas oublier les doutes évoqués dans l'article précédent sur les mesures concernant les pieux de diamètre 0,35 et 0,50 m (Neves et al., 2000). La seconde série d'expérimentations ayant conduit à des valeurs plus fortes de la charge ultime (entre 50 et 100 % d'augmentation), il n'est plus étonnant de constater que la réponse des modèles théoriques est élastique sur un domaine de sollicitations important.

Une autre source d'incertitudes au niveau de la modélisation peut expliquer les différences observées. En effet, on ne dispose d'aucune informa-

tion sur les phénomènes d'interactions sol-structures. Il est donc logique de reconsidérer les valeurs des paramètres de frottement φ'_c et c'_c au contact sol-pieu.

Recalage des paramètres caractérisant le comportement d'interface

L'analyse du frottement latéral mesuré permet de recalibrer les valeurs des paramètres mécaniques associés aux éléments d'interface sol-fût. Afin de ne retenir que le comportement en frottement, on considère seulement les pieux travaillant en traction. Les charges ultimes (Q_u) correspondent

alors aux charges reprises par le frottement latéral de chaque pieu sur la longueur z du fût :

$$Q_u = \pi D \int_0^z (\sigma'_{r0} \tan \varphi'_c + c'_c) dz + \pi D \int_0^z (\Delta \sigma'_{r0} \tan \varphi'_c) dz$$

où D est le diamètre du pieu ; σ'_{r0} , la contrainte radiale effective initiale ($\sigma'_{r0} = K_0 \gamma' z$, avec K_0 le coefficient de pression des terres au repos) ; γ' , le poids volumique du sol ; φ'_c , l'angle de frottement à l'interface ; c'_c , la cohésion à l'interface et $\Delta \sigma'_{r0}$, la variation de la contrainte radiale effective.

La détermination des paramètres de frottement (c'_c et φ'_c) peut être réalisée de deux façons :

- > par la combinaison des résultats des trois essais de traction pour obtenir un système de trois équations à deux inconnues c'_c et φ'_c , puis par une optimisation des valeurs des paramètres ;
- > par l'exploitation d'une seule relation par essai de traction. Cela suppose de fixer une valeur à la cohésion pour déterminer l'angle de frottement.

C'est la seconde option qui a été choisie. Les valeurs obtenues pour c'_c et φ'_c sont ensuite considérées comme les valeurs initiales d'une étude paramétrique visant à minimiser les différences entre les courbes charge-déplacement théorique et expérimentale.

Le calcul des valeurs initiales est effectué en négligeant la variation de la contrainte radiale

$\Delta \sigma'_{r0}$, en supposant que la cohésion au contact est égale à la cohésion de la couche de sol correspondante et en utilisant la moyenne des paramètres K_0 et γ . Pour les trois pieux en traction, l'analyse a montré que la valeur de l'angle de frottement φ'_c était d'environ 20 degrés. Partant de ces valeurs caractérisant le frottement, une série de calculs par éléments finis a été réalisée tant en traction qu'en compression afin de minimiser les différences entre les courbes charge-déplacement calculées et mesurées. Le tableau V présente les valeurs de paramètres obtenues par cette analyse à rebours.

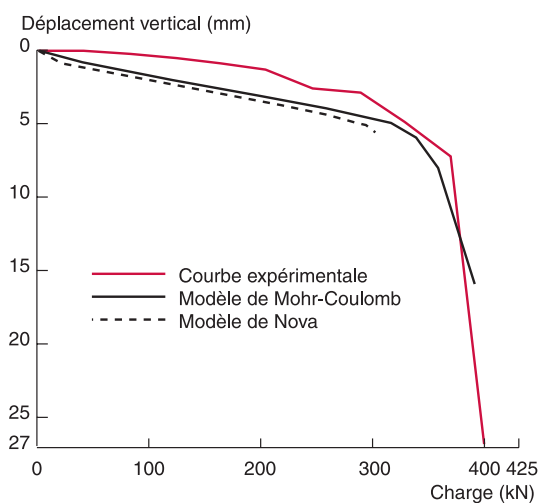
TABLEAU V
Paramètres pour le comportement d'interface

Profondeur (m)	φ'_c (degrés)	c'_c (kPa)
0,00 à 6,30	23	6
6,30 à 8,30	20	5
8,30 à 10,60	20	7

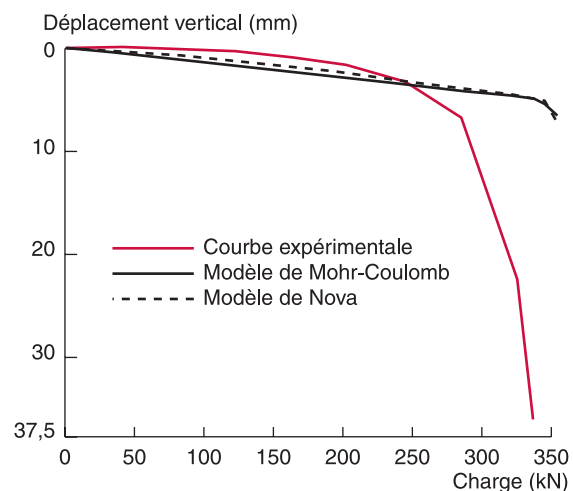
Comparaison calculs-mesures pour les nouveaux paramètres de frottement

Courbes charge-déplacement

L'ensemble des modélisations des essais de pieux a été refait avec les nouvelles valeurs des paramètres de frottement. Les figures 6 à 8 montrent une amélioration certaine dans la simulation des courbes charge-déplacement expérimentales.



a. Essai de traction.



b. Essai de compression.

Fig. 6 - Courbes charge-déplacement obtenues pour le pieu de diamètre 0,35 mètre.
Comparaison calculs-mesures pour les nouveaux paramètres de frottement.

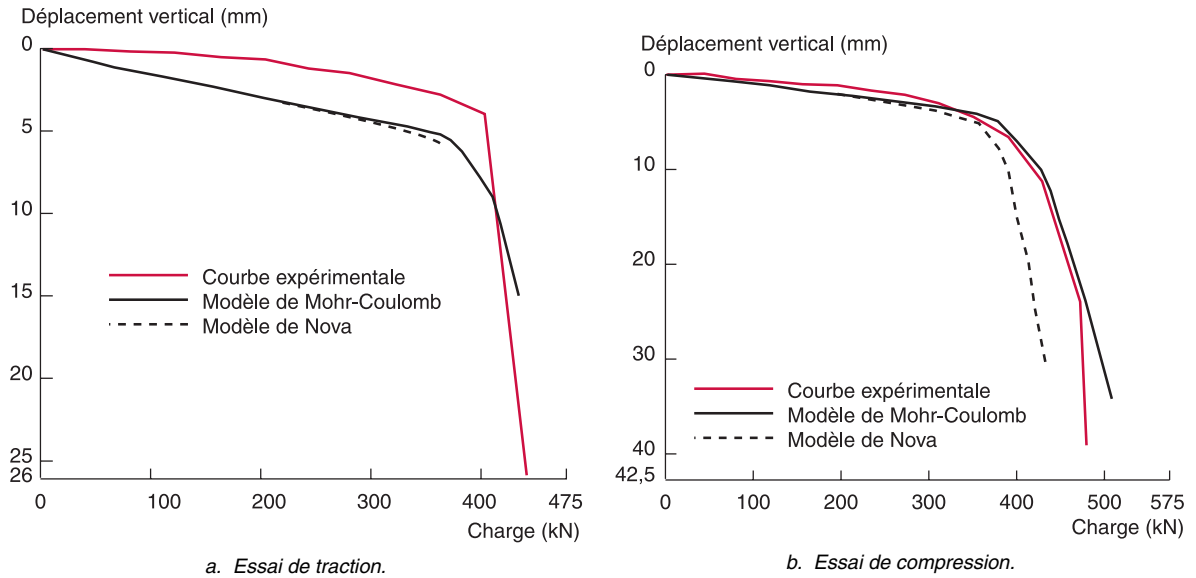


Fig. 7 - Courbes charge-déplacement obtenues pour le pieu de diamètre 0,40 mètre.
Comparaison calculs-mesures pour les nouveaux paramètres de frottement.

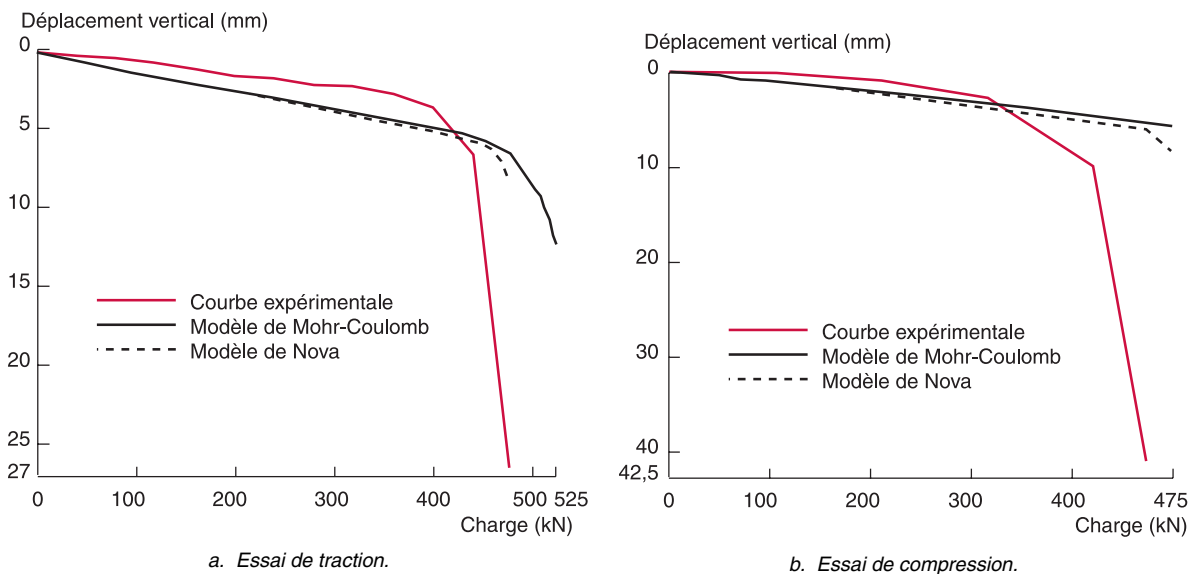


Fig. 8 - Courbes charge-déplacement obtenues pour le pieu de diamètre 0,50 mètre.
Comparaison calculs-mesures pour les nouveaux paramètres de frottement.

L'analyse montre que :

➤ le modèle de Mohr-Coulomb fournit une simulation satisfaisante des essais de traction sur les pieux de diamètre 0,35 et 0,40 m, et de l'essai de compression sur le pieu de 0,40 m (fig. 6a, 7a et 7b). En revanche, les modélisations des autres essais surestiment systématiquement les déplacements dans la phase élastique ainsi que l'asymptote aux grands déplacements (fig. 6b, 8a et 8b). Ce point n'est pas étonnant vu les explications données plus haut ;

➤ le modèle de Nova conduit à de meilleurs résultats, dans l'ensemble plus proches des mesures que le modèle de Mohr-Coulomb. Les meilleures simulations obtenues avec le modèle de Nova sont relatives au pieu de 0,50 m en traction et au pieu de 0,40 m en compression. Les autres modélisations surestiment les déplacements dans la phase élastique et fournissent des amorces d'asymptote soit plus faibles, soit plus importantes. Les différences entre les asymptotes estimées à partir des résultats numériques (correspondant à

une non-convergence du processus de résolution) et mesurées restent acceptables, puisque l'erreur relative est inférieure à 20 %.

D'une manière plus générale, on note une meilleure concordance entre les courbes charge-déplacement dans le cas des essais de compression (fig. 6b, 7b et 8b). En revanche, des différences importantes apparaissent pour les essais de traction, principalement pour les pieux de diamètre 0,35 et 0,40 m (fig. 6a, 7a et 8a). Celles-ci sont dues essentiellement à une mauvaise estimation du module de déformation des couches de sol, la partie linéaire de la courbe charge-déplacement est plus éloignée des mesures que dans le cas des essais de compression. L'explication peut provenir soit des incertitudes expérimentales, soit de la présence d'hétérogénéités locales, mais aussi de l'insuffisance des modèles de comportement qui ne distinguent pas les chemins de sollicitations en compression de ceux en extension. Par la suite, on présentera essentiellement les résultats concernant les pieux de diamètre 0,40 m pour lesquels les mesures et l'absence d'hétérogénéités paraissent les plus fiables (Neves et al., 2000).

Les charges appliquées en tête (Q_t) peuvent être décomposées en charges de frottement latéral (Q_s) et charges de pointe (Q_p), et comparées aux valeurs expérimentales. La figure 9 confronte les courbes théoriques, exprimant les charges Q_t , Q_s et Q_p en fonction du déplacement vertical en tête du pieu, aux courbes expérimentales ($Q_{t_{ex}}$, $Q_{s_{ex}}$, $Q_{p_{ex}}$) correspondantes, pour le pieu de diamètre 0,40 m soumis à un essai de compression.

Les courbes charge en pointe-déplacement vertical en tête et frottement latéral-déplacement vertical en tête sont mal simulées, même si la courbe totale est bien reproduite. La charge de pointe est sous-estimée et les variations du frottement latéral après le pic ne sont pas prises en compte par le modèle. Ces variations sont certainement liées à la structure du sol. En effet, en raison de la forte teneur en argile (environ 25 %) et en sable fin (55 %) du sol, il est fort probable que, sous l'effet du cisaillement à l'interface, un réarrangement des particules se produit entraînant la chute du frottement latéral et la tendance à se stabiliser vers un frottement résiduel. On peut donc penser que la mauvaise simulation provient essentiellement de l'utilisation de la loi de frottement de Coulomb à l'interface qui ne permet pas de représenter la décroissance observée de la charge de frottement pour des déplacements importants. Comme la contrainte radiale varie peu, la loi de frottement de Coulomb impose au frottement une valeur quasiment constante (fig. 9). D'où il découle une mauvaise simulation de la répartition de la sollicitation en charge de pointe et charge de frottement latéral.

Distribution des contraintes dans le sol et des efforts le long des pieux

Pour les modèles de comportement étudiés, on a observé les points suivants concernant le champ de contraintes dans le massif de sol (σ_{rr} , σ_{zz} , $\sigma_{\theta\theta}$, τ_{rz}) :

➤ il n'apparaît pas de variations significatives de la contrainte radiale σ_{rr} par rapport à sa valeur ini-

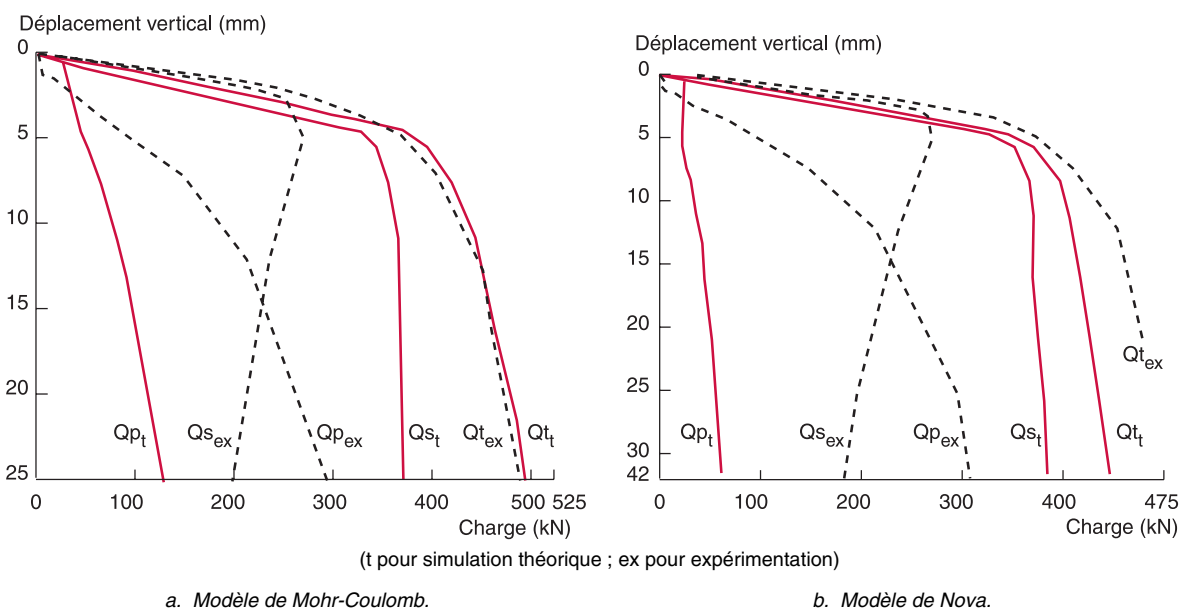


Fig. 9 - Comparaison calculs-mesures. Courbes Q_t , Q_s , et Q_p en fonction du déplacement vertical en tête du pieu de diamètre 0,40 m pour un essai de compression.

tiale. Pour les essais de traction, $|\sigma_{rr}|$ augmente légèrement au voisinage immédiat des pieux. Pour les essais de compression, $|\sigma_{rr}|$ diminue légèrement. À une distance d'environ $4 r_0$, les variations disparaissent complètement et la contrainte radiale est de nouveau égale à la contrainte initiale ;

➤ les variations de la contrainte orthoradiale $\sigma_{\theta\theta}$ sont assez semblables à celles de la contrainte radiale et d'un ordre de grandeur (en valeur absolue) similaire. Au-delà d'une distance de $4 r_0$, les variations s'estompent et la contrainte orthoradiale est égale à la contrainte initiale ;

➤ pour une profondeur fixée, la contrainte tangentielle τ_{rz} suit avec une bonne approximation la loi de variation proposée par Frank (1975) :

$$\tau_{rz} = \tau_0 \frac{r_0}{r}$$

➤ où τ_0 est la valeur de la contrainte tangentielle en r_0 ;

➤ les variations de la contrainte σ_{zz} sont plus erratiques et dépendent fortement du modèle de comportement choisi. Les variations observables cessent également à une distance d'environ $4 r_0$.

Les figures 10 et 11 illustrent les distributions d'efforts le long du fût des pieux de diamètre 0,40 m en fonction de l'effort total appliqué, calculées respectivement à l'aide du modèle de Mohr-Coulomb et du modèle de Nova. Les

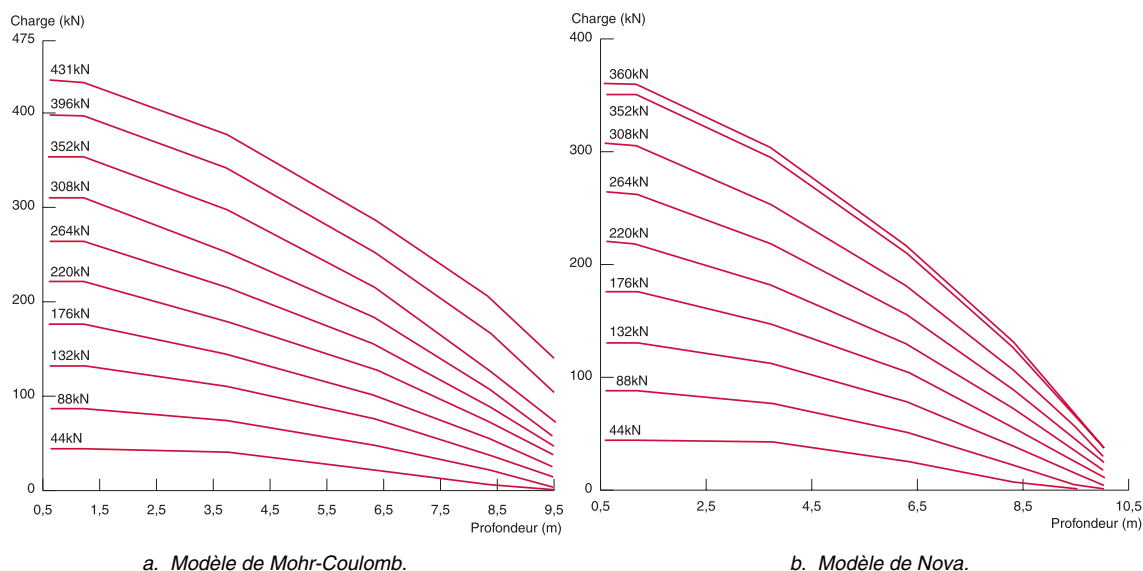


Fig. 10 - Distribution des efforts le long du fût du pieu de diamètre 0,40 m en fonction de la charge totale appliquée pour un essai de traction.

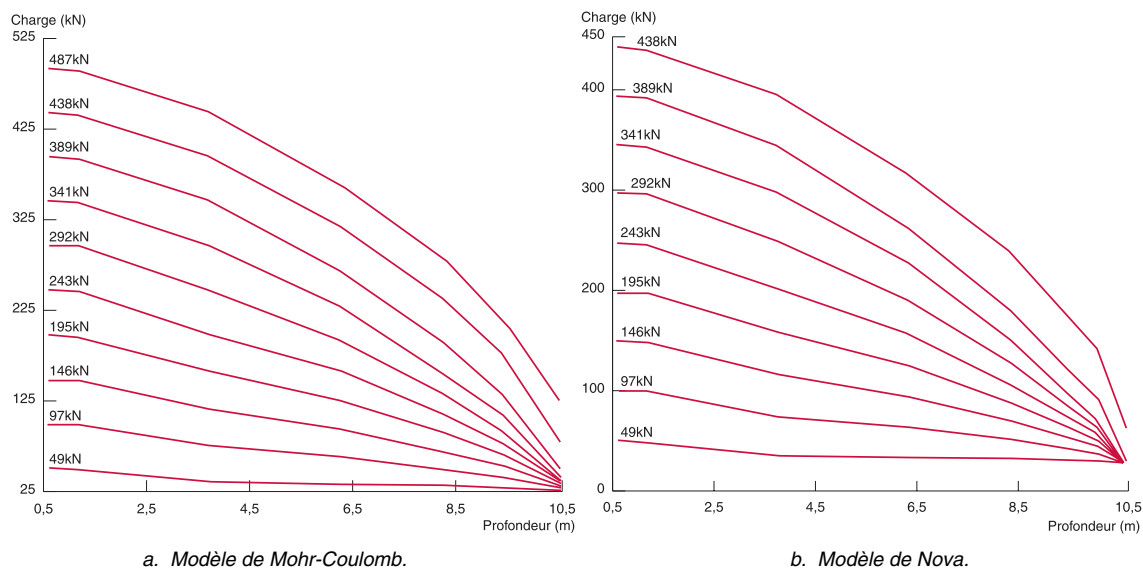


Fig. 11 - Distribution des efforts le long du fût du pieu de diamètre 0,40 m en fonction de la charge totale appliquée pour un essai de compression.

tableaux VI et VII comparent les efforts calculés et mesurés en fonction de la profondeur. L'allure des courbes théoriques est très similaire à celle des courbes expérimentales. Notamment, pour l'essai de traction sur le pieu de diamètre 0,40 m, le modèle de Nova fournit une distribution d'efforts très proches des mesures. En revanche, le modèle de Mohr-Coulomb surestime ces efforts à partir d'un certain niveau de sollicitation. Ces différences démontrent que le calage des paramètres de frottement sur ce type d'essai ne suffit pas pour décrire de manière satisfaisante les mesures, il faut aussi une bonne loi de comportement pour le sol.

Pour l'essai de compression, le modèle de Nova sous-estime les efforts de pointe à tout instant de la sollicitation. Deux facteurs expliquent cette sous-estimation :

- > d'une part, la plasticité du modèle n'est pas assez « mobilisée » sous la pointe du pieu. Cette faible mobilisation est aussi attestée par la faible étendue de la zone plastique ;
- > d'autre part, la charge totale est mal redistribuée à cause de la loi de frottement qui ne décrit pas le radoucissement du frottement latéral tel qu'il a été observé *in situ*.

Une meilleure description du comportement des pieux passera donc par un perfectionnement du

modèle de comportement du sol au voisinage des structures et des améliorations du modèle de frottement sol-structures.

Zones plastiques autour des pieux

Les zones plastiques constatées à la fin des calculs sont assez peu étendues et localisées au voisinage du pieu. Une très grande partie du massif de sol demeure dans le domaine élastique. La figure 12 illustre cela dans le cas de la modélisation avec le modèle de Nova du pieu de diamètre 0,40 mètre.

Pour le modèle de Mohr-Coulomb, la zone plastique pour les essais de traction est limitée à la pointe du pieu, où il y a eu décollement de la base. Pour l'essai de compression, une zone plastique de faible étendue se développe autour de la base du pieu. Ces deux zones occupent une surface à peu près similaire. Le frottement latéral est en fait totalement mobilisé et le pieu glisse avant que ne se développe la plasticité dans le sol.

Pour le modèle de Nova, les zones plastiques sont plus importantes mais elles restent au voisinage immédiat des pieux et présentent l'aspect général d'une bande entourant les pieux. Pour l'essai de traction, cette bande se termine en surface par une zone plastique plus étendue. Et réciproquement,

TABLEAU VI
Valeurs des efforts calculés et mesurés le long du pieu (essai de traction)

Profondeur (m)	Charge en tête appliquée (Q = 352 kN)		Charge d'essai (Q = 360 kN)
	Mohr-Coulomb	Nova	Mesures
1,20	351,80	350,70	360,0
3,75	296,80	295,50	318,0
6,30	216,30	211,50	226,0
8,30	130,00	126,80	125,0
9,45	73,60	67,50	69,0

TABLEAU VII
Valeurs des efforts calculés et mesurés le long du pieu (essai de compression)

Profondeur (m)	Charge en tête appliquée (Q = 438,30 kN)		Charge d'essai (Q = 440 kN)
	Mohr-Coulomb	Nova	Mesures
1,20	437,90	436,60	440
3,75	391,60	390,80	380
6,30	313,10	312,30	310
8,30	235,80	234,30	240
9,45	176,70	168,80	225

pour l'essai de compression, cette bande de plasticité se termine à la base du pieu par une zone plastique plus large, causée par la pénétration dans le sol de la pointe du pieu. Là encore, le frottement latéral est totalement mobilisé et le pieu glisse avant que la plasticité et l'écroutissage ne se développent réellement dans le massif de sol (fig. 12).

Conclusions

Les essais de chargement de pieux forés, réalisés à l'École d'ingénieurs de São Carlos de l'université de São Paulo (Brésil), ont été modélisés à l'aide du progiciel de calcul par éléments finis CÉSAR-LCPC. Le comportement du massif de sol a été décrit successivement par les modèles de Mohr-Coulomb (élastoplasticité parfaite) et Nova (élastoplasticité avec écroutissage). Des résultats satisfaisants ont été obtenus en ce qui concerne les courbes charge-déplacement vertical en tête des pieux pour les essais de compression. En revanche, pour les essais de traction, des différences notables ont été observées entre les courbes calculées et mesurées. D'une manière générale, les simulations effectuées avec le modèle de Nova conduisent aux meilleurs résultats.

Parmi les six essais réalisés, deux seulement semblent véritablement fiables quant aux mesures de la distribution des efforts le long de chaque pieu : ce sont les essais de traction et de compression sur les pieux de diamètre 0,40 m. La confrontation de ces mesures aux résultats des simulations réalisées avec le modèle de Nova montre une bonne concordance pour l'essai de traction : la distribution des efforts est bien rendue. Pour l'essai de compression, l'allure fournie par le modèle de Nova est satisfaisante mais les ordres de grandeur ne sont pas bons. Les efforts de pointe sont très sous-estimés à tout instant de la sollicitation ; en particulier, la charge de pointe ultime est inférieure d'un facteur trois à la valeur mesurée. Par ailleurs, les variations du frottement latéral ne sont pas bien décrites par la simulation.

Les différences importantes observées dans la distribution des efforts le long des pieux peuvent être expliquées par les facteurs suivants :

- la non-prise en compte dans le modèle de calcul du mode de mise en place des pieux. Cela a certainement une influence sur le frottement latéral initial ;
- l'emploi d'une loi de frottement de type élastoplasticité parfaite. Comme la contrainte radiale

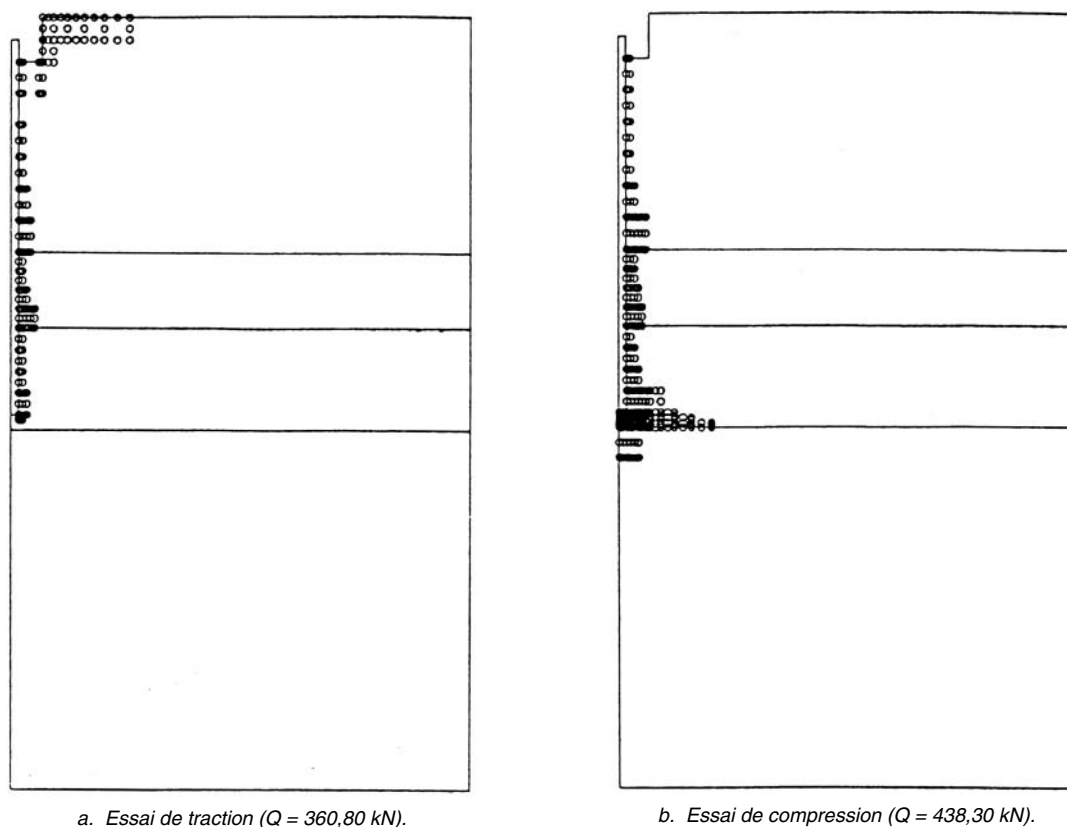


Fig. 12 - Zones plastiques associées au modèle de Nova pour les essais de traction et de compression effectués sur le pieu de diamètre 0,40 mètre. Les chargements correspondent aux derniers incréments appliqués.

varie peu, la loi de frottement de Coulomb impose au frottement une valeur quasiment constante en contradiction avec les mesures qui montrent un radoucissement. D'où, une mauvaise simulation de la répartition de la sollicitation en charge de pointe et charge de frottement latéral ;

➤ les incertitudes liées à l'instrumentation du site d'essai (mesures des efforts et des déplacements), à la reconnaissance du site et donc à la détermination des paramètres de comportement du sol. L'absence d'essais de type interactions sol-structures est aussi un facteur important d'incertitudes.

En conséquence, une meilleure description des essais réalisés passera par un perfectionnement du

modèle de comportement du sol au voisinage des structures et par une amélioration de la loi d'interactions sol-structures.

Si cette étude a mis de nouveau en évidence les difficultés de valider un modèle numérique d'interactions sol-structures par rapport à des mesures réalisées sur des ouvrages en vraie grandeur, elle montre aussi que l'on peut obtenir des résultats acceptables pour les courbes *charge en tête-tassement*. Les modèles étudiés ne permettent pas aujourd'hui de reproduire l'ensemble des mesures (notamment, la redistribution des efforts due aux interactions), mais ils peuvent déjà être utiles pour des analyses de tassement dans les projets de géotechnique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NEVES M., MESTAT Ph., FRANK R., DEGNY E. (2001), Étude du comportement de pieux forés. I. Expérimentations *in situ* et en laboratoire, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **231**, mars-avril, pp. 39-54.

FRANK R. (1975), *Étude théorique du comportement des pieux sous charge verticale. Introduction de la*

dilatance. Rapport de recherche, **46**, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 238 pages.

NEVES M. (1993), *Análise elastoplástica pelo método dos elementos finitos de estacas escavadas*, Doctorat en géotechnique de l'École d'ingénieurs de São Carlos, Université de São Paulo, Brésil, 261 pages.

ABSTRACT

Behavioral study of bored piles II. Finite element modeling

M. das NEVES, Ph. MESTAT, R. FRANK, E. DEGNY

Full-scale testing on piles in both tension and compression has been modeled with the CESAR-LCPC finite element computation software package. Two models were used to represent soil behaviour : a perfectly-plastic elastic model (Mohr-Coulomb), and an elastoplastic model with strain hardening (Nova, 1982). In order to reproduce the soil-pile interface behaviour, contact elements along with a Coulomb friction criterion were employed. Following recalibration on the friction parameter values, a comparison of numerical results with measurement data becomes acceptable for the lead vertical load-displacement curves. However, the distributions of forces calculated along the pile do not correlate with the measured values. The friction law applied herein is too simple to describe the actual variations in lateral friction. Improvements are needed to perfect the pile computation models as well as to represent all functional aspects of the soil-structure interface.