

Comportement et modélisation des marnes de Las Planas

Y.L. Lee, N. Arafati, E. Leca, J.P. Magnan & P. Mestat
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

J.F. Serratrice
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Aix-en-Provence, France

RESUME : Le tunnel de Las Planas, réalisé entre 1976 et 1982 au nord de Nice (France), se compose de deux tubes creusés, en partie, dans des marnes du Pliocène. Cet ouvrage a fait l'objet d'une campagne de reconnaissance détaillée et d'une instrumentation destinée à suivre le comportement de la galerie pendant et après les travaux. Les essais de laboratoire effectués sur des échantillons de marne prélevés sur le site ont permis d'analyser le comportement de ce matériau et d'étudier les possibilités de sa modélisation. Cette étude comprend les étapes suivantes : (1) analyse des résultats d'essais en laboratoire, (2) recherche de paramètres permettant de caractériser le comportement du terrain pour quelques lois de comportement, (3) comparaison des résultats des modèles aux résultats d'essais en laboratoire. La présente communication décrit les principales conclusions de cette étude, qui ne considère que les aspects non visqueux du comportement de la marne.

ABSTRACT : The Las Planas tunnel was completed in the north of Nice (France), between 1976 and 1982. It consists of two tunnels, which were partly excavated in Pliocene marls. Extensive ground investigation was carried out for this project and the tunnel was instrumented to analyze both the short and long term responses of the ground to excavation. Laboratory tests carried out on soil samples taken from the site allowed to analyze the behaviour of the marls and study the capability of constitutive models to simulate the observed behaviours. This research included the following steps : (1) analysis of laboratory tests, (2) determination of parameters relevant to a number of selected constitutive models, (3) comparison between predicted behaviours and observed test results. The present paper describes the main results obtained from this study. It is limited to the non-viscous response of the marls.

1 INTRODUCTION

Le tunnel de Las Planas, construit entre 1976 et 1982 au nord de Nice (France), a fait l'objet d'une campagne d'instrumentation destinée à suivre la réponse du terrain pendant et après le creusement. L'ouvrage se situe en partie dans des marnes du Pliocène et se compose de deux tubes de 1 km de long. Le comportement de la marne rencontrée pendant les travaux a pu être étudié soigneusement, au moyen d'essais de laboratoire effectués sur des échantillons prélevés sur le site. Les mesures effectuées

pendant les travaux et les résultats des essais de laboratoire constituent une base expérimentale importante, qui est actuellement utilisée pour la validation de modèles de calcul par éléments finis. Cet article décrit la première étape de ce programme de recherche, qui a consisté à analyser les moyens de simuler le comportement observé de la marne en laboratoire. Après une présentation des résultats de laboratoire puis des modèles de comportement envisagés, on examine l'aptitude de ces différents modèles à représenter correctement le comportement du terrain.

2 DONNEES EXPERIMENTALES

Le matériau étudié est une marne du pliocène assez consistante, homogène, de couleur grise et non fissurée. Elle a été prélevée par blocs en plusieurs endroits sur une centaine de mètres du tube Sud, devant une machine à attaque ponctuelle Westfallia. La marne étudiée peut être considérée comme homogène à l'échelle du massif de sol et à l'échelle de l'ouvrage (Autoroute A.8, région de Nice, France ; Gaudin et Serratrice, 1986). Plusieurs types d'essais de laboratoire ont été mis en oeuvre à l'aide de divers appareillages. Tous les essais mécaniques ont été réalisés en conditions drainées, à vitesse lente.

2.1 Description des essais de laboratoire

Les éprouvettes ont été taillées manuellement à partir des blocs, puis pesées et montées dans une cellule triaxiale. Les essais à basse pression ont été réalisés à l'aide d'un matériel classique. Pour les essais triaxiaux à haute pression (contrainte initiale P_0 supérieure à 1 MPa), on a utilisé une presse triaxiale Wykeham Farrance de 250 kN, des cellules et une alimentation en pression d'une capacité de 12 MPa du même constructeur. La pression de confinement P_0 a été appliquée par paliers de 1 à 4 jours jusqu'à la valeur désirée. Le suivi de la consolidation a permis d'apprécier le comportement de la marne sur chemin isotrope. Une contre-pression (de 0,1 à 0,5 MPa suivant les essais) a été appliquée dès le premier palier de consolidation.

Après avoir été consolidées sous une pression isotrope initiale P_0 , les éprouvettes ont été cisailées en conditions drainées. Des vitesses de cisaillement lentes ont été adoptées. La phase de cisaillement a duré de 2 à 17 jours, la durée totale d'un essai pouvant atteindre un mois (Gaudin et Serratrice, 1986).

Le programme d'essais en laboratoire comprenait 3 essais triaxiaux isotropes à haute pression, 7 essais triaxiaux de compression à haute pression et 3 essais oedométriques K_0 à haute pression avec un cycle de chargement-déchargement.

2.2 Résultats et interprétation des essais

Pour les essais triaxiaux à haute pression, on a mesuré le déplacement axial, l'effort axial et la variation de volume à partir de l'eau interstitielle drainée; le cisaillement a été poursuivi jusqu'à une déformation axiale de l'ordre de 10 à 15% sans atteindre véritablement un palier de résistance. Pour les essais oedométriques à haute pression, on a mesuré les variations dans le temps des paramètres suivants : tassement, effort axial et pression latérale.

Tableau 1 Caractéristiques générales des marnes

No. essai	P_0 MPa	γ kN/m ³	e
T034	1,0	20,40	0,383
T043	1,25	20,60	0,429
T011	2,0	21,70	0,385
T041	3,6	21,60	0,380
T023	5,0	21,20	0,385
T042	7,6	20,64	0,383
T031	10,1	21,90	0,359
I072	-	21,20	0,335
I081	-	21,44	0,360
I101	-	21,30	0,380
K082	-	21,57	0,359
K103	-	21,71	0,381
K106	-	21,60	0,380
$w_L=34$	$I_p=14$	$w=10,8\%$	
$\gamma_d=19,1$ kN/m ³			

T : essai triaxial de compression ; I : essai triaxial isotrope ; K : essai oedométrique ; P_0 : contrainte moyenne initiale; γ : poids volumique; e : indice des vides ; w : teneur en eau ; γ_d : poids volumique sec ; w_L : limite de liquidité ; I_p : indice de plasticité.

Les paramètres physiques et mécaniques déduits des essais triaxiaux sont indiqués dans le Tableau 1. Les résultats expérimentaux sont illustrés par les courbes ($\epsilon_1, q/p$) et (ϵ_1, ϵ_v) de la figure 1.

Tous les essais présentés ont été réalisés en conditions drainées. Par conséquent, les

contraintes mesurées correspondent à des contraintes effectives.

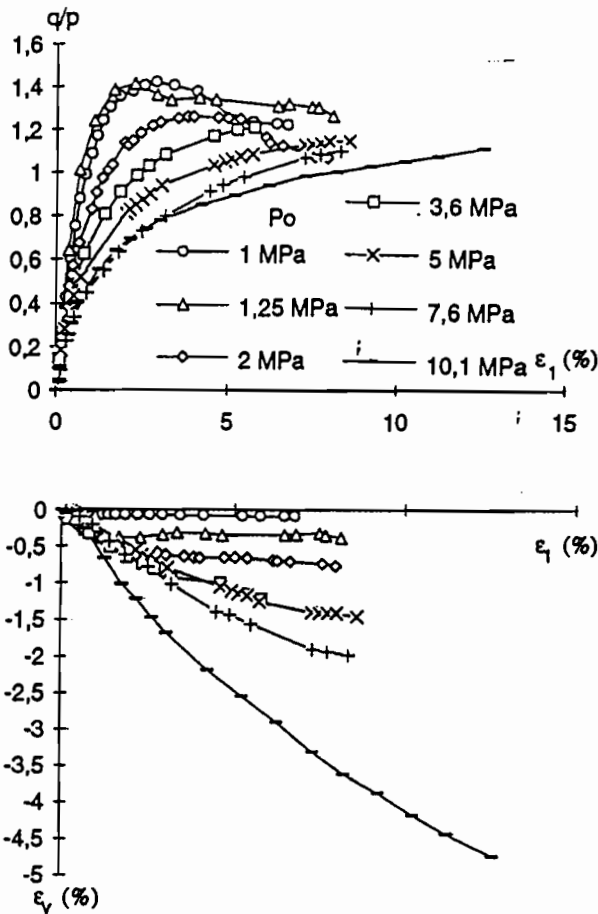


Fig.1 Essais triaxiaux sur la marne de Las Planas : courbes expérimentales.

3 MODELES DE COMPORTEMENT ETUDIÉS

Le comportement de la marne a été analysé à l'aide de différents modèles : modèle élastique non linéaire de Duncan et Chang (1970), modèle Cam-Clay modifié de Roscoe et Burland (1968). Les principales caractéristiques de ces modèles sont rappelées ci-dessous.

3.1 Modèle de Duncan et Chang

Le modèle non linéaire de Duncan et Chang (1970) est fondé sur une représentation hyperbolique de la courbe contrainte-déformation (ϵ_1, q) observée dans un essai triaxial de compression (Kondner, 1963) ; les

caractéristiques de résistance sont régies par un critère de Mohr-Coulomb et le modèle suppose de plus que le module tangent est fonction de la contrainte de confinement (Janbu, 1963). Les incréments de contrainte sont reliés aux incréments de déformation par l'intermédiaire d'un module d'Young tangent E_t et d'un coefficient de Poisson tangent ν_t :

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi')(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c' \cos \phi' + 2\sigma_3 \sin \phi'} \right]^2 K_h P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

et

$$\nu_t = \frac{G^* - F^* \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{\left[1 - \frac{d^*(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_t} \right]^2}$$

où σ_1 et σ_3 sont les contraintes principales effectives majeure et mineure, c' est la cohésion drainée du terrain et ϕ' l'angle de frottement et $K_h, n, R_f, G^*, F^*, d^*$ sont des paramètres adimensionnels déterminés à partir des résultats d'essais et P_a une pression de référence prise égale à la pression atmosphérique. Les huit paramètres du modèle peuvent être déduits des résultats d'essais à l'appareil triaxial en conditions non drainées. Le modèle présente notamment l'intérêt de prendre en compte la variation de la déformabilité du terrain en fonction de la contrainte σ_3 .

3.2 Modèle Cam-Clay modifié

Le modèle Cam-Clay modifié a été proposé par Roscoe et Burland (1968). Ce modèle est fondé notamment sur le concept d'état critique. Si l'on ne considère que des essais sur éprouvettes cylindriques, l'état de contrainte et de déformation est défini par les quatre variables suivantes :

$$p = \frac{1}{3} \text{tr}(\underline{\sigma}), \quad q = \sqrt{\frac{1}{3} s:s}, \quad \epsilon_v = \text{tr}(\underline{\epsilon}), \quad \epsilon_q = \sqrt{\frac{2}{3} e:e}$$

où p et q représentent la contrainte moyenne et le déviateur des contraintes, ε_v et ε_q les déformations volumique et déviatorique ; $\underline{\varepsilon}$ et $\underline{\varepsilon}^e$ désignent respectivement les tenseurs des contraintes et déformations déviatoriques (convention de signes : contraintes positives en compression).

Les hypothèses du modèle, en compression isotrope (soit $q=0$), sont rappelées ci-dessous :

pour $dp < 0$:

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e = \frac{de}{1+e_0} = \frac{\kappa}{1+e_0} \frac{dp}{p}$$

et pour $dp > 0$ ($p=p_c$) :

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_v - d\varepsilon_v^e = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \frac{dp_c}{p_c}$$

avec

$$p_c = p_{co} \exp\left(\frac{1+e_0}{\kappa} \varepsilon_v^p\right)$$

e_0 étant l'indice des vides initial ; $d\varepsilon_v^e$ et $d\varepsilon_v^p$ sont respectivement les incréments de déformations volumiques élastique et plastique ; p_{co} est une grandeur de référence, κ et λ sont des paramètres de déformabilité issus des courbes de consolidation.

La loi d'écoulement est normale et le critère de plasticité a pour équation :

$$f(p, q, \varepsilon_v^p) = \frac{q^2}{M^2 p} + p - p_c(\varepsilon_v^p) \leq 0$$

p_c étant le paramètre d'érouissage et M la valeur du rapport q/p à l'état critique.

Le modèle Cam-Clay modifié comprend donc 5 paramètres (M , λ , κ , e_0 , p_{co}) qui peuvent être déduits des résultats d'essais triaxiaux en compression et d'essais oedométriques.

3.3 Variantes du modèle Cam-Clay modifié

Le comportement d'un matériau linéaire élastique isotrope (obéissant à la loi de Hooke)

est caractérisé par deux paramètres E et ν , ou K et G . Le modèle Cam-Clay modifié dans sa forme classique, fait l'hypothèse d'un comportement élastique caractérisé par :

$$K = \frac{1+e_0}{\kappa} p \quad \text{et} \quad G = \text{constante}$$

Toutefois, de nombreux codes de calcul par éléments finis supposent E et ν constants dans la programmation de ce modèle.

Nous avons examiné trois manières différentes de représenter le comportement élastique isotrope dans le modèle Cam-Clay modifié et, notamment, nous avons étudié l'influence de la prise en compte de la non-linéarité de la phase élastique. Les hypothèses suivantes ont été successivement considérées :

(i) Elasticité linéaire isotrope avec K et G constants ;

(ii) Elasticité non linéaire isotrope avec K variable et G constant :

$$K = \frac{1+e_0}{\kappa} p$$

(iii) Elasticité non linéaire isotrope avec K et G variables :

$$K = \frac{1+e_0}{\kappa} p \quad \text{et} \quad G = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \left(\frac{1+e_0}{\kappa}\right) p$$

Dans la mesure où le coefficient de Poisson ν est supposé constant, ceci revient à introduire une relation explicite entre K et G .

4 MODELISATION ET COMPARAISON AVEC LES RESULTATS D'ESSAIS

Les paramètres correspondant aux essais de la figure 1 ont été évalués pour chacun des modèles considérés : modèle de Duncan-Chang et modèle Cam-Clay modifié avec trois hypothèses de variation des modules élastiques. Les valeurs des paramètres obtenues sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2. Valeurs des paramètres pour chaque modèle.

Modèle	Valeurs des paramètres			
	Duncan -Chang	K_h	n	R_f
$P_o < 2,5$ MPa	1646	0,3	0,69	1,84
	ϕ'	G^*	F^*	d^*
	26,6°	0,82	0,43	11,2
$P_o > 2,5$ MPa	K_h	n	R_f	c' (MPa)
	2314	0,2	0,73	0,67
	ϕ'	G^*	F^*	d^*
	24,7°	0,28	-0,03	2,05
Cam-Clay	M	P_{co} (MPa)	e_o	
Modifié	1,18	2,5	0,38	
	$\lambda(P_o < 2,5$ MPa)	$\lambda(P_o > 2,5$ MPa)	κ	
	0,02	0,04	0,007	
	K (MPa)	G (MPa)	ν	
hypothèse (i)	293	135	-	
hypothèse (ii)	-	135	-	
hypothèse (iii)	-	-	0,3	

L'analyse des résultats des essais oedométriques et de compression isotrope montre que la limite entre le domaine normalement consolidé et le domaine surconsolidé se situe aux alentours de 2,5 MPa : cette valeur a été retenue pour la pression de préconsolidation en compression isotrope. Elle est cohérente avec celle déduite de la courbe d'état limite proposée par Gaudin et Serratrice (1986) et représentée sur la figure 2.

Afin de simuler théoriquement un essai triaxial, un logiciel appelé LOIS-LCPC a été développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Mestat, 1991). Ce logiciel a été conçu comme une aide au développement et à la validation des lois de comportement de type élastoplastique avec écrouissage ou élastique non linéaire ; il permet de comparer la modélisation théorique aux résultats expérimentaux et ainsi d'ajuster au mieux les valeurs des paramètres.

4.1 Modélisation de l'essai triaxial isotrope

La première étape de la modélisation du comportement de la marne de Las Planas a consisté à simuler l'essai de compression isotrope à l'aide du modèle Cam-Clay modifié.

La comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux est, dans le cas des hypothèses (ii) et (iii) avec $\nu=0,3$, très satisfaisante, tant pour la phase de chargement que pour la phase de déchargement (figure 3). Seuls les résultats correspondant à ce dernier cas sont représentés sur cette figure. En revanche, l'hypothèse (i) donne des résultats moins satisfaisants, notamment dans la phase de déchargement.

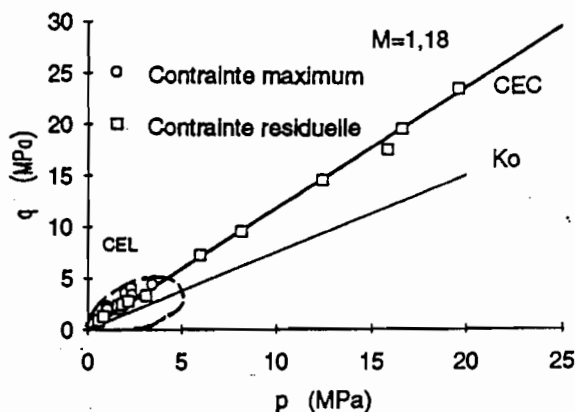


Fig. 2 Courbes d'état limite (CEL) et d'état critique (CEC).

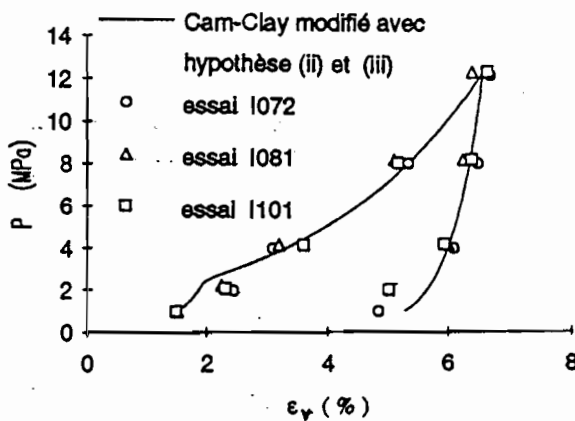


Fig.3 Comparaison entre le calcul [modèle Cam-Clay modifié avec hypothèses (ii) et (iii)] et les résultats expérimentaux (3 essais isotropes).

La seconde étape de la modélisation du comportement de la marne de Las Planas concerne les essais triaxiaux de compression. La modélisation effectuée distingue le comportement surconsolidé ($P_o < 2,5$ MPa) du comportement normalement consolidé ($P_o > 2,5$ MPa).

4.2 Modélisation du comportement surconsolidé de la marne

Trois essais de compression triaxiale (T034, T043, T011) ont été étudiés. La modélisation à l'aide du modèle Duncan-Chang, conduit à une bonne simulation des courbes d'essais dans la phase initiale du chargement. Par contre, lorsque le rapport de contrainte q/p croît, la simulation des courbes ($\epsilon_1, q/p$) et (ϵ_1, ϵ_v) devient moins satisfaisante (figures 4, 5 et 6).

La modélisation à l'aide du modèle Cam-Clay modifié est en fait réalisée au travers de trois simulations, qui correspondent respectivement à la prise en compte des trois types d'élasticité définis dans la partie 3.3. Ces trois modèles conduisent à des résultats analogues, si ce n'est un léger excédent de déformation volumique dans le cas d'une élasticité linéaire (figures 4, 5 et 6). Les trois modèles conduisent à une simulation satisfaisante de l'essai au début du chargement ($\epsilon_1 < 1\%$), mais prédisent des déformations volumiques excessives pour $\epsilon_1 > 1\%$. Par ailleurs, la simulation des courbes ($\epsilon_1, q/p$) est d'autant meilleure que la phase de radoucissement est faible, ce qui n'est pas étonnant puisque le modèle Cam-Clay modifié a été à l'origine développé pour représenter le comportement normalement consolidé des matériaux argileux.

4.3 Modélisation du comportement normalement consolidé de la marne

Quatre essais de compression triaxiale (T041, T023, T042, T031) ont été étudiés. La modélisation à l'aide du modèle Duncan-Chang, conduit à de bonnes simulations pour l'ensemble de ces essais sauf pour l'essai T031.

La modélisation à l'aide du modèle Cam-Clay modifié avec les trois hypothèses d'élasticité montre que les simulations des courbes ($\epsilon_1, q/p$) sont généralement en bon accord avec les résultats expérimentaux, mais que les courbes (ϵ_1, ϵ_v) sont plus ou moins bien simulées (figures 7 à 10). Comme il a été remarqué dans la modélisation du comportement surconsolidé,

l'hypothèse d'une élasticité linéaire conduit à des déformations volumiques plus importantes que l'hypothèse d'une élasticité non linéaire. Dans ce dernier cas, les meilleurs résultats sont obtenus avec l'hypothèse (ii) en diagramme (ϵ_1, ϵ_v), les hypothèses (ii) et (iii) donnant des résultats pratiquement identiques en diagramme ($\epsilon_1, q/p$).

D'une manière générale, on peut dire que, quelle que soit l'hypothèse retenue pour le type d'élasticité, les courbes ($\epsilon_1, q/p$) sont assez bien simulées par le modèle Cam-Clay modifié. Pour ce qui est des courbes (ϵ_1, ϵ_v), la prise en compte d'une élasticité non linéaire [hypothèse (ii) ou (iii)] conduit à de meilleurs résultats que l'hypothèse d'une élasticité linéaire [hypothèse (i)].

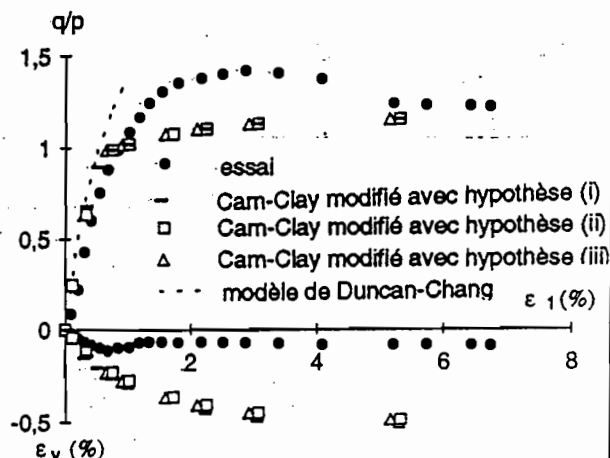


Fig.4 Comparaison entre simulations théoriques et résultats expérimentaux ($P_0=1$ MPa).

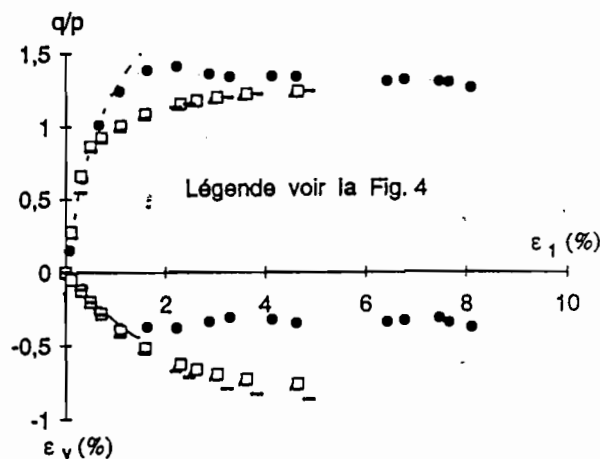


Fig.5 Comparaison entre simulations théoriques et résultats expérimentaux ($P_0=1,25$ MPa).

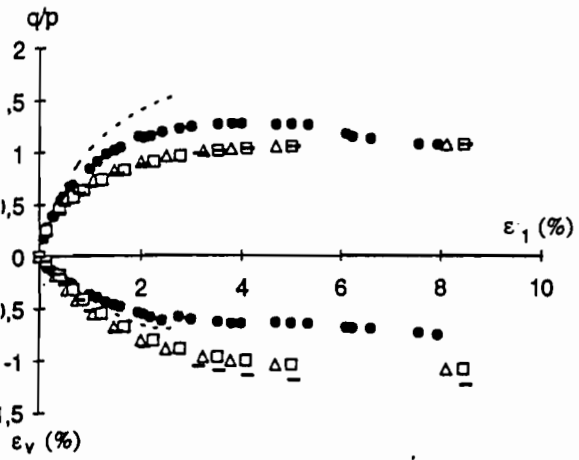


Fig. 6 Comparaison entre simulations théoriques et résultats expérimentaux ($P_0=2$ MPa).

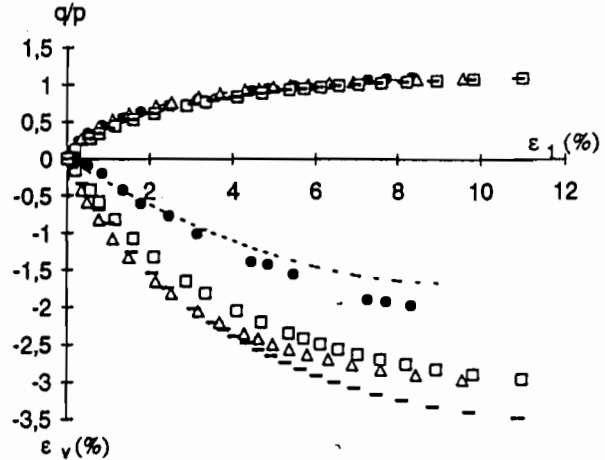


Fig. 9 Comparaison entre simulations théoriques et résultats expérimentaux ($P_0=7,6$ MPa).

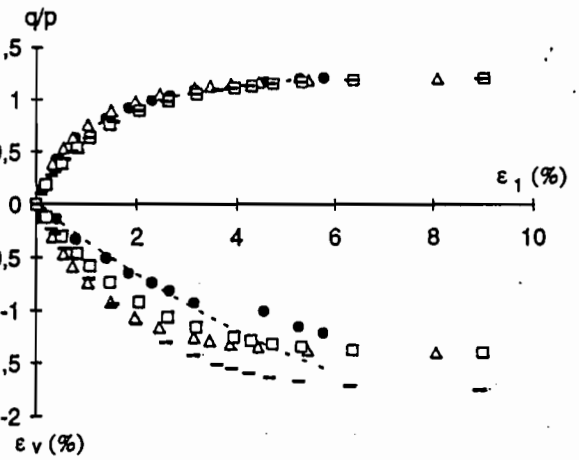


Fig. 7 Comparaison entre simulations théoriques et résultats expérimentaux ($P_0=3,6$ MPa).

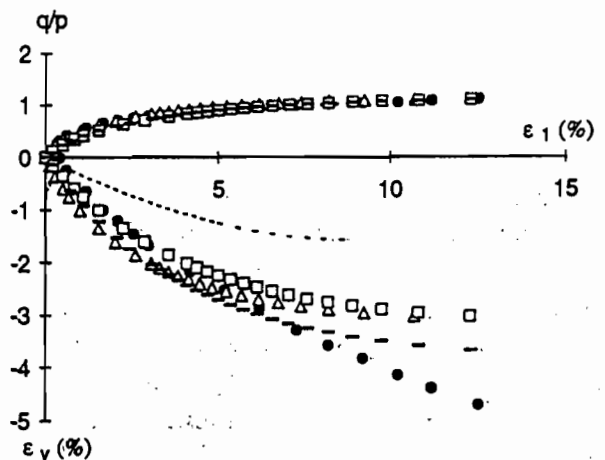


Fig. 10 Comparaison entre simulations théoriques et résultats expérimentaux ($P_0=10,1$ MPa).

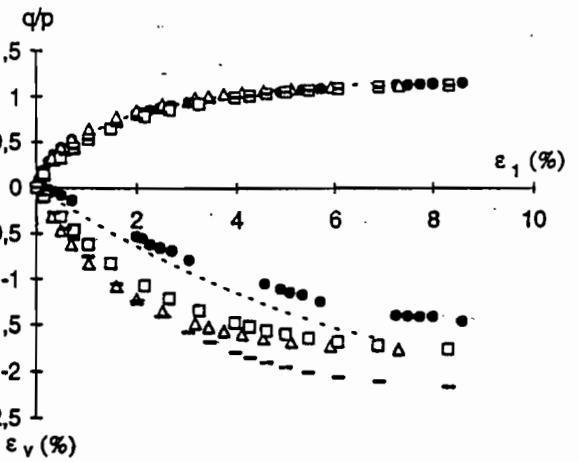


Fig. 8 Comparaison entre simulations théoriques et résultats expérimentaux ($P_0=5$ MPa).

- essai.
- modèle de Duncan-Chang
- Cam-Clay modifié avec hypothèse (I)
- Cam-Clay modifié avec hypothèse (II)
- △ Cam-Clay modifié avec hypothèse (III)

Légende de Fig. 6 à Fig. 10.

5 CONCLUSIONS

Les échantillons prélevés pendant la construction du tunnel de Las Planas ont permis une étude détaillée du comportement des marnes du Pliocène prélevées sur ce site. Des essais triaxiaux à différentes pressions de confinement

ainsi que des essais de consolidation isotrope ont été réalisés sur ces marnes.

Dans cet article, on a cherché à simuler ces résultats d'essais à partir de modèles de comportement utilisés en mécanique des sols : élasticité non linéaire (loi de Duncan et Chang), élastoplasticité avec écrouissage (modèle Cam-Clay modifié). Dans ce dernier cas, plusieurs variantes de représentation de la phase élastique ont été considérées.

La pression de préconsolidation des marnes déduite des résultats d'essais est de l'ordre de 2,5 MPa. On a donc examiné, dans l'évaluation des différents modèles, les essais triaxiaux effectués en conditions surconsolidées ($P_0 < 2,5$ MPa) et les essais normalement consolidés ($P_0 > 2,5$ MPa).

Les modèles étudiés conduisent généralement à des résultats satisfaisants pour de faibles déformations, mais conduisent à des prévisions différentes des résultats d'essai pour $\epsilon_1 > 1\%$. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des essais surconsolidés, pour lesquels les modèles considérés ne permettent pas de prédire le pic de résistance observé dans le diagramme ($\epsilon_1, q/p$) et conduisent à une surestimation des déformations volumiques. En conditions normalement consolidées, la loi de Duncan et Chang conduit à des prévisions proches des résultats d'essai, à l'exception de l'essai effectué à $P_0=10,1$ MPa. Les différentes variantes du modèle Cam-Clay modifié conduisent à des résultats très satisfaisants en diagramme ($\epsilon_1, q/p$), mais tendent à surestimer les déformations volumiques. Cette tendance est toutefois moins marquée pour la variante élastique non linéaire avec K et G variables. Les hypothèses (ii) et (iii) du modèle Cam-Clay modifié conduisent à des résultats identiques pour la simulation des essais de consolidation isotrope et permettent une représentation très fidèle de ces essais tant en chargement qu'en déchargement.

Par ailleurs, il faut également tenir compte, dans cette comparaison entre prévisions des modèles et résultats d'essais, du fait que certaines paramètres n'ont pu être pris en compte,

notamment l'anisotropie de la marne. Ceci pourrait, en partie, expliquer certaines différences observées entre mesures et résultats de calcul.

Cette étude constituait la première étape de travaux de recherche consacrés à la validation de modèles de calcul par éléments finis. Les conclusions tirées de cette analyse du comportement de la marne de Las Planas et de sa modélisation seront utilisées, dans un deuxième temps, pour simuler la construction du tunnel et analyser la capacité de ces différents modèles à représenter la déformation du massif au cours des différentes étapes de creusement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Duncan, J.M. & Chang, C.Y. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of A.S.C.E.*, vol. 96, No. SM5: 1629-1653.
- Gaudin, B. & Serratrice, J.F. 1986. Etude des propriétés rhéologiques d'une marne. Rapport interne, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Aix-en-Provence, F.A.E.R. 1.09.31.3
- Janbu, N. 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, Germany, Vol. 1., 19-25.
- Kondner, R.L. 1963. Hyperbolic stress-strain response : cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of A.S.C.E.*, vol. 89, No. SM1 : 155-143.
- Mestat, P. 1991. Recherche de solutions analytiques pour les modèles de Cam-Clay dans un but de validation numérique Programmes CESAR-LCPC et LOIS-LCPC. Rapport interne Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, F.A.E.R. 1.16.21.0.
- Roscoe, K.H. & Burland, J.B. 1968. On the generalized stress-strain behaviour of 'wet clay. in J. Heyman and F.A. Leckie (eds.) *Engineering plasticity* : 535-609. Cambridge Cambridge University Press.
- Schofield, A.N. & Wroth, C.P. 1968. *Critical state soil mechanics*. London : McGraw-Hill.