

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Propriétés Mécaniques des Argiles après un Choc

## Mechanical Properties of Clays after Shocks

J. BIAREZ            Prof. à l'Ecole Centrale de Paris, et à la Faculté des Sciences de Grenoble,  
 J. FOURNIER        Ing. de recherches,  
 M. RUDELLE        Ing. de recherches à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures de Paris, France

RESUME : Il arrive fréquemment que des matériaux soient soumis à des contraintes élevées, mais brèves (ondes de choc). Deux essais simples nous ont montré que certains matériaux argileux subissaient des modifications des propriétés mécaniques après ces sollicitations. Pour ces matériaux, les observations sont les suivantes : A l'oedomètre, deux phénomènes se produisent : une consolidation après les chocs alors que le matériau était à l'équilibre avant, et une diminution de l'indice de compressibilité pouvant aller jusqu'à 20 %. Au scissomètre de laboratoire la résistance au cisaillement augmente au cours du temps pour dépasser parfois de 50 % la valeur initiale.

Pour donner un début d'explication à ces phénomènes, il faut faire intervenir l'organisation des particules et la nature des liaisons, et donc les paramètres qui les induisent. Nous voyons apparaître certaines tendances et nous pouvons commencer à associer tel type de comportement à telles valeurs de ces paramètres.

### INTRODUCTION

Un certain nombre de phénomènes artificiels ou naturels peuvent créer dans le sol des contraintes importantes (plusieurs mégapascals) avec des vitesses de déformation élevées et des durées brèves (inférieures à la seconde). Ceci se passe par exemple lors de tirs d'explosifs ou de compactage par pilonnage. Il est intéressant de connaître la réponse d'un matériau à ce genre de sollicitation. Deux cas sont alors à distinguer : - la réponse est limitée au passage de l'onde, - la réponse se poursuit bien après le passage de cette onde.

Dans le premier cas se trouvent les matériaux non saturés, ou grossiers et saturés (c'est-à-dire ayant une perméabilité très élevée). Lors du passage de l'onde, le matériau subit en général un écrouissage qui se traduit par une densification du matériau. C'est ce qui se passe pour l'essai Proctor et à plus grande échelle dans un chantier de compactage par pilonnage. Dans certains cas, si ces matériaux ont une densité supérieure à la densité critique correspondant à leur état de contrainte, et si les déformations déviatoires sont importantes, il y aura dilataance.

Dans le deuxième cas, on trouve les sols fins saturés. Aucune déformation volumique importante ne peut avoir lieu lors du passage de l'onde, à moins que l'on ait une perméabilité suffisante, et l'on sait que généralement les perméabilités in-situ sont bien supérieures à celles mesurées au laboratoire. Dans ce cas, on observe sur certains matériaux argileux une augmentation de pression interstitielle et une augmentation des propriétés mécaniques au cours du temps dépassant largement le temps de dissipation de la pression interstitielle. Le passage de l'onde a donc marqué le matériau, l'a "désorganisé" et celui-ci est ensuite le siège d'une lente

"réorganisation"(ces termes sont pris dans un sens très large).

Une étude plus approfondie de ces phénomènes s'est avérée nécessaire. Nous les avons d'abord mesurés le plus précisément possible, en mettant au point deux essais simples. Ensuite nous avons commencé une analyse basée sur la physicochimie des argiles.

### LES ESSAIS :

Oedomètre avec chocs : nous avons utilisé un oedomètre classique, l'échantillon avait un diamètre de 70 mm pour une hauteur de 24 mm. Après un chargement statique jusqu'à une valeur déterminée, l'échantillon est laissé au repos 24 heures, la consolidation primaire est alors terminée. Puis on laisse tomber en chute libre une masse de 1,5 kg d'une hauteur de 0,5 m sur le piston de l'oedomètre. Le bâti de chargement nous permettait de donner le choc sans modifier la charge verticale appliquée. Le tassement occasionné par le choc est suivi de manière classique pendant 24 heures. Cette opération est recommencée à deux reprises. 24 heures après le troisième choc, le chargement statique est alors poursuivi suivant la méthode habituelle jusqu'à 1 ou 2 MPa, puis on suit le déchargement. Dans le même temps, on fait un essai sans choc à titre de référence.

Les divers types de courbes de consolidation obtenues sont représentées sur la figure 1. Dans les cas a et b, nous avons représenté les courbes correspondant au pas de chargement précédent les chocs et au premier choc. Les deux chocs suivants donnent le même phénomène mais atténué. Les courbes de consolidation après les chocs présentent un tassement instantané important provoqué par le choc. Ce tassement provient, pour la majeure partie, d'un départ de matière autour des plaques poreuses. Mais il ne faut pas

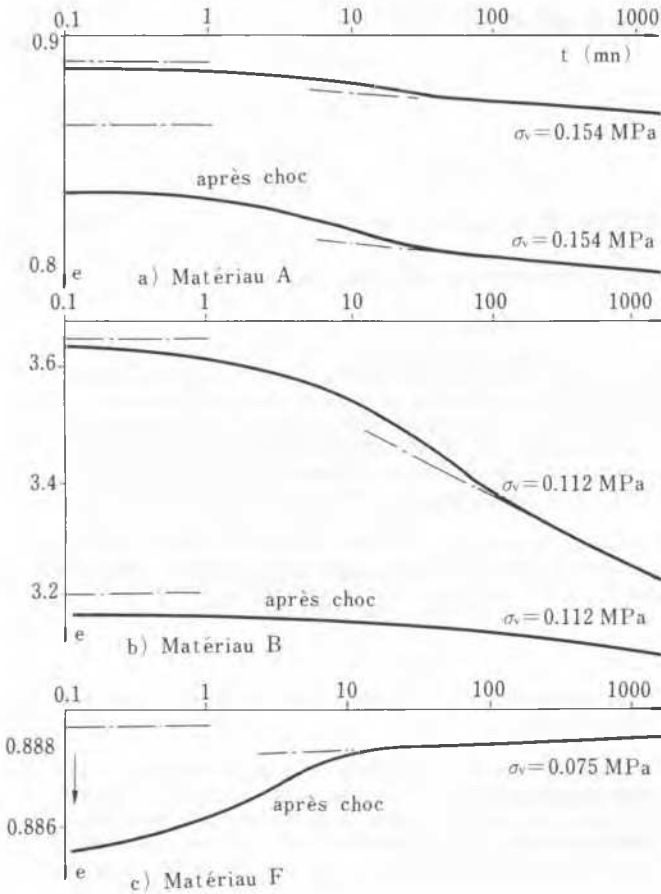


Fig. 1 Courbes de consolidation ou de gonflement après les chocs

négliger deux autres hypothèses : une consolidation durant le choc (celui-ci bien que bref, crée des contraintes importantes de plusieurs mégapascals) et éventuellement, bien que le degré de saturation des matériaux testés soit supérieur à 0,99 une compression des bulles de gaz.

Examinons l'évolution après les chocs :

Dans le cas a) l'essai montre une reprise de la consolidation primaire alors que la charge statique n'a pas varié et que le matériau, avant le choc, était en consolidation secondaire. Le choc a donc modifié le comportement du matériau qui ne supporte plus la charge verticale qui lui est appliquée.

Le cas b) montre une courbe qui ne présente aucune consolidation primaire visible. On continue seulement à mesurer la consolidation secondaire correspondant à la charge statique appliquée. Ce matériau n'a pas été modifié par le passage de l'onde de choc.

Dans le cas c) le matériau était en phase de déchargement lors du choc. Ce matériau était surconsolidé et après le tassement initial on note un gonflement faible, mais réel.

Les courbes oedométriques présentées figure 2 montrent l'évolution de la déformabilité du matériau.

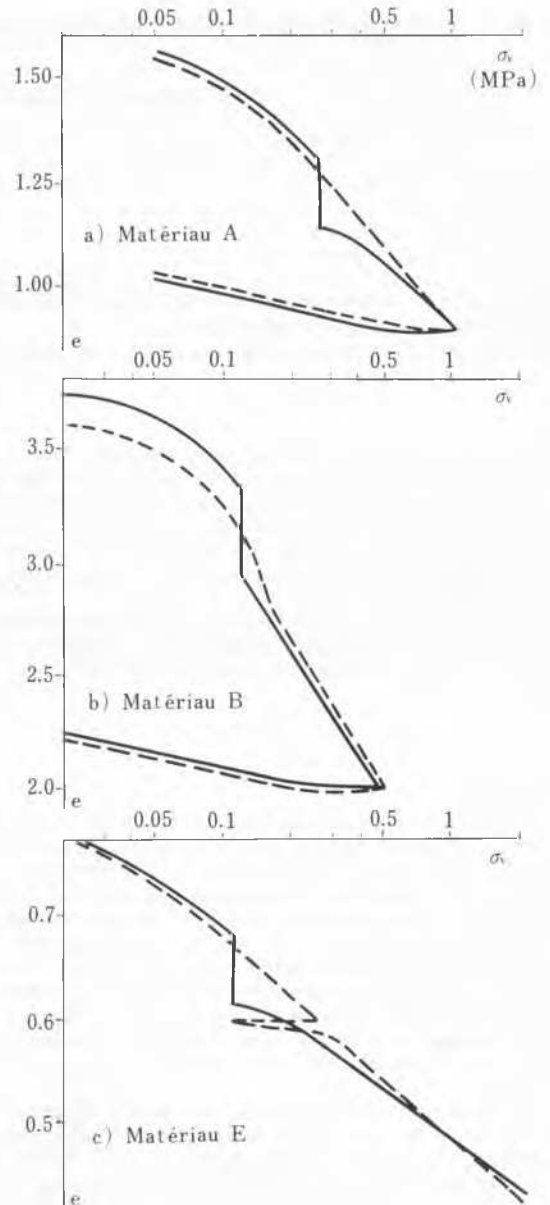


Fig. 2 Courbes oedométriques

Nous avons représenté, chaque fois, en pointillé les courbes de références sans choc. Les cas a et b correspondent à ceux de la figure 1. Dans tous les cas la courbe oedométrique présente une partie verticale qui représente le tassement dû au choc (pour une contrainte verticale constante). La partie avant les chocs est toujours au-dessus de la courbe témoin. Ceci est dû au fait que le calcul de l'essai est fait à partir des valeurs finales (teneur en eau, hauteur,...), la perte de matière au cours du choc, ignorée dans le calcul, se traduit par une surestimation de l'indice des vides avant les chocs. La partie de courbe après les chocs est par contre exacte.

Les courbes a) montrent une surconsolidation après les chocs et une courbe oedométrique de pente plus faible. Ceci signifie que le matériau est devenu moins compressible.

Les courbes b) ne présentent aucun de ces caractères.

Ici il n'y a pas eu modification du matériau, de même que l'on n'avait pas observé de consolidation après les chocs.

Les courbes c) correspondent à un matériau qui a le même type de comportement que en a) mais moins marqué. Lors de l'essai de référence, nous avons fait un déchargement de façon à créer une surconsolidation statique. Il est intéressant de comparer les formes des courbes oedométriques après les surconsolidations statique et par choc. Le retour sur la courbe vierge se fait plus rapidement pour le statique. On vérifie par ailleurs que la surconsolidation statique n'a pas modifié l'indice de compressibilité. Dans tous les cas, la courbe de gonflement n'est pas modifiée par les chocs.

Cisaillement dans une cellule oedométrique :  
Pour cet essai, nous avons réalisé une batterie de 12 oedomètres simplifiés schématisés figure 3.

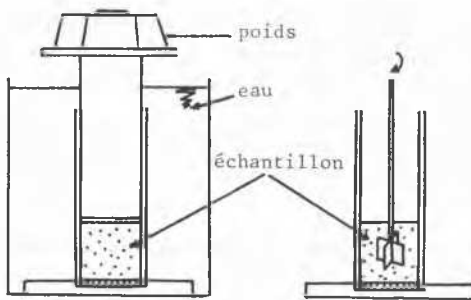


Fig. 3 Schéma de l'oedomètre simplifié et de l'essai de cisaillement réalisé à l'intérieur

Des échantillons préparés de façon identique de 40 mm de hauteur et 40 mm de diamètre sont mis en place et chargés dans l'oedomètre. Après 4 jours de repos sous une charge statique déterminée, on donne, sur dix d'entre eux deux chocs successifs avec une masse de 1,5 kg tombant de 0,5 m. Deux échantillons sont gardés comme témoins. Ces oedomètres seront ouverts à divers temps après les chocs et un essai de cisaillement au vane-test est réalisé sur l'échantillon avec des pales de 12,7 x 12,7 mm. La valeur du couple maximum est alors reportée en fonction du temps sur un graphique et comparée aux témoins.

Sur la figure 4 sont représentés deux types de comportement possible. Dans le cas a) l'évolution de la résistance au cisaillement est étendue dans le temps et après un mois de repos elle est largement supérieure à la valeur initiale. Dans le cas b) l'évolution se concentre dans les premiers jours de repos, la valeur de la résistance au cisaillement après un mois est de l'ordre des valeurs initiales. Dans certains essais, l'évolution de la résistance au cisaillement n'est pas monotone pendant la première semaine de repos. L'amélioration lorsqu'elle existe semble se faire régulièrement au delà de cette première semaine, mais nous n'avons que rarement trouvé une asymptote après un mois de repos ce qui laisse entendre que l'évolution du matériau après les chocs n'est pas terminée.

Les résultats de ces essais présentent parfois une dispersion importante qui diminue quand la contrainte de consolidation augmente. Nous n'analyserons ces essais qu'en tenant compte de la résistance à moyen

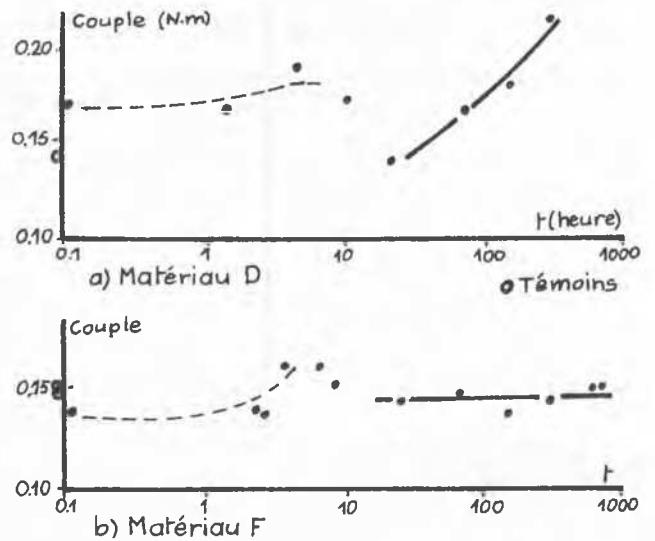


Fig. 4 Evolution de la résistance au cisaillement en fonction du temps d'attente après les chocs

terme (15 jours, un mois), temps d'attente maximum étudié. Nous avons mesuré l'évolution de la pression interstitielle après les chocs par un capteur placé à la base de l'échantillon, elle est compatible avec la durée de la consolidation primaire à l'oedomètre et n'exède pas quelques heures.

#### ANALYSE DES RESULTATS :

Cette étude ne s'est adressée qu'aux argiles proprement dites au sens de MITCHELL (1956). C'est-à-dire que les grains inertes ne sont plus en contact et le comportement du sol est donné par la phase argileuse. Pour tenter de classer les différents comportements des sols argileux après les chocs nous avons repris l'analyse de SEED et CHAN (1959) mettant en évidence l'importance de l'organisation des particules sur le comportement mécanique des argiles. Devant les difficultés de lire cet organisation nous avons testé séparément 3 paramètres fondamentaux qui l'induisent :

- la minéralogie
- les cations d'hydratation - nature  
- concentration
- l'histoire - mécanique  
- physicochimique

L'analyse complète des matériaux testés est donnée dans le tableau I

Dans le tableau II résumant les résultats obtenus on voit que les argiles fortement hydratées :

- soit parce qu'elles sont très gonflantes comme la montmorillonite,
- soit parce qu'elles sont saturées par un ion très hydratant comme le sodium (en faible concentration),
- soit parce qu'elles sont peu consolidées, ne présentent pas d'évolution après les chocs.

Les autres matériaux ont tendance à donner une évolution favorable après le choc. L'évolution de la résistance au cisaillement après les chocs est en général extrêmement longue. Cette augmentation des propriétés mécaniques peut-être rapprochée de la thixotropie telle que l'a définie MITCHELL (1961), bien que

Matériau	Granulométrie		Minéralogie ( % )				C.E.C meq / 100 g	Cations échangeables mv / 100 g				Limites d'Atterberg	
	% < 2 $\mu$	% < 50 $\mu$	Kaolinite	Illite	Smectites	Inertes		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>
A*	46,2	100	76	20	0	4	17,3	2,6	2,1	0,3	1,1	68	40
B	33,2	93,6	0	21	79	0	79,5	22	53	14	156	56	27
C*	69,2	99,2	0	0	100	0	49,6	59	17	2,2	0,3	105	54
D	33,7	84,7	20	20	45	15	61	101	31	8,4	31	-	-
E*	29	95,1	5	14	55	26	45	101	2,8	1	0,4	33	17
F*	32,5	100	24	25	39	12	40	111	20	1,9	5,7	43	19

Toutes ces valeurs sont rapportées à la fraction inférieure à 2 $\mu$

\* Matériaux préparés au laboratoire

Tableau I : Caractéristiques des principaux matériaux testés

Préparation	Essai	Matériau	Oedomètre				Scissomètre			Atterberg		Phénomènes mis en évidence	
			$\sigma_v$ choc (MPa)	I <sub>c</sub>	consolidation après choc	$C_{cc}/C_{ct}$	$\sigma_v$ choc (MPa)	I <sub>c</sub>	R <sub>f</sub> /R <sub>t</sub>	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>		
	1	A	0.237	0.79	oui	0.78	0.132	0.68	1.16			Influence de la minéralogie	
	2	B	0.112	-2.03	non	1	0.132	-1.64	1				
	3	C	0.112	0.61	non	1	0.132	0.61	1				
avec de l'eau de ville	4	A	0.237	0.74	oui	0.83	0.172	0.71	1.2	68	40	concentration	Influence du cation
avec une solution centi- normale de NaCl	5	A	0.237	0.53	non	1	0.172	0.52	1	62	34		
avec une solution normale de NaCl	6	A	0.237	0.63	oui	0.78	0.172	0.79	1	68	28		
	2	B	0.112	-2.03	non	1	0.132	-1.64	1				
percolation d'une solu- tion normale de KCl	7	B	0.212	-	oui	0.88	-	-	-	-	-	nature	
	8	D	-	-	-	-	0.132	-	1.48			Etat du matériau	
	9	D	-	-	-	-	0.084	-	1				
	1	A					0.132	0.68	1.16			Histoire	
consolidé sous 0.21 MPa	10	A	-	-	-	-	0.132	0.75	1.06				
	11	F	0.112	0.31	non	0.98	0.132	0.34	1				

$C_{cc}/C_{ct}$  et  $R_f/R_t$  : Rapports des indices de compressibilité et des résistances au cisaillement (choqué/témoin)

Tableau II : Résumé des principaux résultats obtenus

cette définition n'exprime pas une augmentation de la résistance au cisaillement par rapport aux valeurs initiales comme nous l'avons rencontré.

Les essais effectués sur la kaolinite préparée avec des solutions salines montrent différents résultats intéressants : - les limites d'Atterberg ne suffisent pas pour prévoir le comportement après les chocs d'une argile puisque les préparations des essais 4, 5, 6, (tableau II) ont des limites voisines mais des comportements opposés. - Si l'on reprend l'analyse proposée par LAMBE et WHITMAN (1969), la kaolinite préparée avec une solution normale de NaCl ou avec de l'eau de ville a un arrangement flocculé alors que la kaolinite préparée avec une solution centinormale de NaCl a un arrangement déflocculé. Or, seule l'argile préparée à l'eau de ville montre une augmentation de la résistance au cisaillement un mois après les chocs. L'arrangement flocculé est probablement une condition nécessaire mais non suffisante pour expliquer ces évolutions, (FOURNIER, 1976).

#### CONCLUSIONS :

- Une sollicitation importante bien que de faible durée peut apporter des modifications des propriétés mécaniques de certaines argiles, par une évolution lente.
- Un début de classement des matériaux peut être fait en fonction de leur nature physicochimique. Les critères de classement dépendront certainement de la sollicitation imposée, (variable non étudiée).

#### REFERENCES :

- FOURNIER J. (1976) "Comportement mécanique des argiles après un choc". Thèse Ingénieur CNAM, PARIS
- LAMBE T.W. and WHITMAN R. (1969) "Soil Mechanics" J. Wiley & Sons.
- MITCHELL J.K. (1956) "The fabric of natural clays and its relation to engineering properties" Highway Research Board, vol. 35.
- MITCHELL J.K. (1961) "Fundamental aspects of thixotropy in soils" ASCE, paper N° 3251, P. 1586, Transactions.
- SEED H.B. and CHAN C.K. (1959) "Structure and strength characteristics of compacted clays" Proceedings ASCE Vol. 85, N° SM 5, October.