



COMPORTEMENT DU MATERIAU PEGMATITE A L'OEDOMETRE

B. Melbouci

Laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Reçu le : 16/02/2008

Accepté le : 23/09/2008

RESUME : *L'étude de la compressibilité de la pegmatite, prélevée à Ait-oumalou (Wilaya de Tizi-ouzou) à un mètre de profondeur, a été entreprise dans le cadre d'une étude générale du comportement des matériaux locaux. Les paramètres de compressibilité ont été déterminés à partir d'essais oedométriques, mettant en jeu des gammes de contraintes très différentes.*

L'article décrit l'étude expérimentale et en analyse les résultats du point de vue des propriétés de la pegmatite. Il fait notamment apparaître qu'une détermination réaliste des paramètres de compressibilité nécessite l'exécution d'essais à des contraintes assez élevées. Ces paramètres fournissent des informations essentielles sur le comportement du sol.

Au cours de cette étude, l'accent a été essentiellement mis sur l'influence de la granulométrie et de l'état de compacité sur la compressibilité de la pegmatite, et elle nous a permis de conclure que le nombre de cycles de chargement - déchargement modifie les caractéristiques du modèle de compressibilité de CAMBOU.

MOTS CLES : *pegmatite, compressibilité, caractéristiques, compacité, granulométrie, chargement, cycles.*

SUMMARY: *The study of the compressibility of the pegmatite, taken in Ait-oumalou (Tizi-ouzou Algeria) with one meter of depth, was undertaken within the framework of a general study of the behavior of local materials. The parameters of compressibility were given starting from tests oedometric and bringing into play ranges of very different stresses.*

The article describes the experimental study and analyzes of them the results from the point of view of the properties of pegmatite. It in particular reveals that a realistic determination of the parameters of compressibility requires the execution of tests to rather high stresses. These parameters provide essential information on the behavior of the ground.

During this study, the stress was primarily laid on the influence of the granulometry and the state of compactness on the compressibility of pegmatite, and it enabled us to conclude that the number of cycles from loading - unloading modifies the characteristics of the CAMBOU model's of compressibility.

1, INTRODUCTION

L'appareillage oedométrique classique a été validé essentiellement pour les sols normalement consolidés ou légèrement surconsolidés. Mais l'appareillage, en particulier les anneaux ne sont pas adaptés pour les milieux granulaires ayant un diamètre important. Or les paramètres que l'on peut déterminer à partir de cet essai sont des paramètres de base de certains modèles décrivant le comportement des milieux granulaires. Cela illustre la nécessité de disposer d'anneaux de dimension plus importante applicables aux pegmatites.

C'est dans ce contexte, qu'à l'occasion d'une recherche sur l'utilisation de nouveaux matériaux dans le domaine routier, s'est posé le problème de la détermination des paramètres de compressibilité de cette pegmatite. L'étude oedométrique entreprise à cette fin a tout d'abord mis en jeu des essais par paliers et permet de soumettre les éprouvettes de sol à une loi de chargement prenant en considération leurs caractéristiques géotechniques propres.

2, GENERALITES ET IDENTIFICATION DU MATERIAU PEGMATITE

La pegmatite est une roche magmatique, qui fait partie de la famille des roches granitiques dont les principaux minéraux sont :

- le feldspath de couleur blanchâtre ;
- le mica noir (en faible quantité) ;
- le quartz de couleur blanc laiteux (en quantité assez importante) ;
- le mica blanc ou muscovite (brillant).

Au niveau de la wilaya de Tizi-ouzou, les gisements de pegmatite sont nombreux. Ils se présentent comme suit :

- les filons concordants (ou filons couches) sont très répandus et bien visibles car ils forment de petites crêtes (cas de Taguermount -ne - Cherif et d'Aboudid). Leur puissance moyenne oscille de 10 à 50 m, leur longueur peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Certains filons de L'oued Sebaou ont été suivis jusqu'à 100m de profondeur suivant le pendage.

-A Dra el Mizan, d'importants gisements ont été observés, ils se présentent soit :

- * en filon pegmatitique en selle
- * en filon discordant dans le coeur d'un pli complexe
- * en filon couche dans les gneiss fins

-A Tizi-ouzou, le filon pegmatitique observé est stratiforme

-Un stock à allure concordante a été aussi observé dans la tranchée de la route longeant l'oued Ksari (entre Dra-Ben-Kheda et Dra el Mizan)

-D'autres gisements aussi importants que ceux cités ci dessus existent dans la région; nous citerons par exemple: celui de Sidi Ali Bounab, celui Tizi-nterga ..etc

2.1, Identification du matériau

L'étude du comportement de la pegmatite rencontrée à Taguermount-Ne-Cherif concerne le matériau qui sera éventuellement utilisé dans les couches de chaussées. Cette étude s'appuie essentiellement sur des essais de laboratoire effectués sur des échantillons de granulométrie différente d'apparence assez hétérogène. Les valeurs des caractéristiques d'identification de ce matériau sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1 : caractéristiques physiques du matériau pegmatite

caractéristiques	w%	γ_s g/cm ³	γ_d g/cm ³	e %	Sr%
valeurs	17.05	2.67	1.78	45.52	81.58

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X (analyse quantitative) a été réalisée sur nos échantillons au laboratoire de minéralogie de l'université de Nancy 1 (France). Les résultats ont été confirmés au niveau du centre de recherche et du développement de Boumerdes (Algérie). En effet, le minéral dominant est le quartz dont le pourcentage oscille entre 60 et 71%, et les minéraux accessoires sont : le feldspath sous forme d'albite dont le pourcentage est entre 16 et 27%, la muscovite entre 6 et 15% et le microcline entre 1 et 3%.

L'essai Proctor est un essai normalisé et adapté aux impératifs du domaine routier, de même que l'essai CBR qui permet d'évaluer la portance d'un sol compacté, pour réaliser des pistes ou des routes. Les normes utilisées pour ces deux essais sont respectivement : NF 94-093 et P94-078. Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2: caractéristiques de l'essai Proctor

Essais	Proctor normal	Proctor modifié
$\gamma_{d\text{opt}}$ [g/cm ³]	1.78	2
w_{opt} %	7.78	9.62

Tableau 3: caractéristiques de l'essai CBR.

Enfoncement [mm]	Indice CBR	Gonflement
2.5	9.63	0
5	38.98	0

Les résultats d'analyse pétrographique ont montré que le minéral le plus abondant est le quartz avec un pourcentage assez élevé. Le feldspath dans ce matériau est présent sous la catégorie d'albite. Les courbes Proctor sont pratiquement aplaties, le matériau est donc très peu sensible à l'eau. Les résultats du CBR par ailleurs montrent que la pegmatite a une portance très favorable et un gonflement nul.

2.2, Essais de résistance à l'usure et à la fragmentation

Essais Micro Deval (MDE): Ces essais sont effectués sur les classes granulaires 4-6.3 ; 6.3-10; 10-14 mm et suivant la norme NFP 18-572 qui définit le mode opératoire pour la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulat. Les résultats de cette étude sont regroupés dans le tableau 4 ci-après.

Essais Los Angeles : Le but de ces essais effectués suivant la norme NFP 18-573 est de mesurer la résistance à la fragmentation des éléments de granulats par la mesure de la quantité d'éléments inférieure à 1.6 mm, produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles. Les valeurs de Los Angeles sont portées dans le tableau 4 ci-après.

Tableau 4 : Résultats des essais Micro Deval et Los Angeles.

Essais	Micro Deval		Los Angeles	
matériau classe granulaire	Matériau sain	Matériau altéré	Matériau sain	Matériau altéré
4 - 6.3	45%	79%	43%	64%
6.3 - 10	44%	77%	39%	60%
10 - 14	32%	48%	28%	45%

3,ESSAIS OEDOMETRIQUES PAR PALIERS

Les essais oedométriques ont été réalisés sur des éprouvettes de 70 mm de diamètre et de 30 mm de hauteur au moyen d'appareillage classique à chargement par paliers. Nous avons retenu pour cette étude trois classes granulaires (0/6 – 6/10 – 10/14). Pour chaque classe granulaire, nous avons réalisé trois séries d'essais correspondant aux trois états de compacité (lâche – dense et humide à l'optimum Proctor).

Exécution de l'essai : le régime de chargement choisi est à paliers de chargement successifs. Les principales caractéristiques du déroulement de l'essai sont les suivantes :

*la première charge appliquée correspond à une charge faible de 1 Kg destinée à garantir un bon contact entre l'éprouvette et le piston.

*A partir de la deuxième charge, le taux d'accroissement de la charge est donné par la

formule: $i = [(\sigma_{n+1} - \sigma_n) / \sigma_n]$ est égal à 1 jusqu'à la charge finale.

*La durée des paliers de chargement est de 24 heures.

D'après Travers et Al (1988) cité par Jrad [2], un matériau pulvérulent soumis à une compression oedométrique réagit différemment suivant la grandeur de la contrainte qui lui est appliquée. Ainsi :

*à faible contrainte, la plus grande partie de la déformation est due à des déformations locales des grains.

*Quand on augmente cette contrainte, la majorité des contacts sont actifs et les grains transmettent les forces qui leur sont appliquées.

*Dans le domaine des contraintes élevées, tous les contacts sont actifs et le comportement macroscopique est donné par la loi de Hertz.

4,COURBES DE CHARGEMENT DECHARGEMENT OBTENUES :

Dans un premier temps, nous avons effectués des essais à plusieurs cycles de chargement-déchargement. Les trois cycles sont réalisés respectivement au troisième puis au cinquième et enfin au dernier palier. Les courbes de compressibilité obtenues sont présentées sur la figure 1.

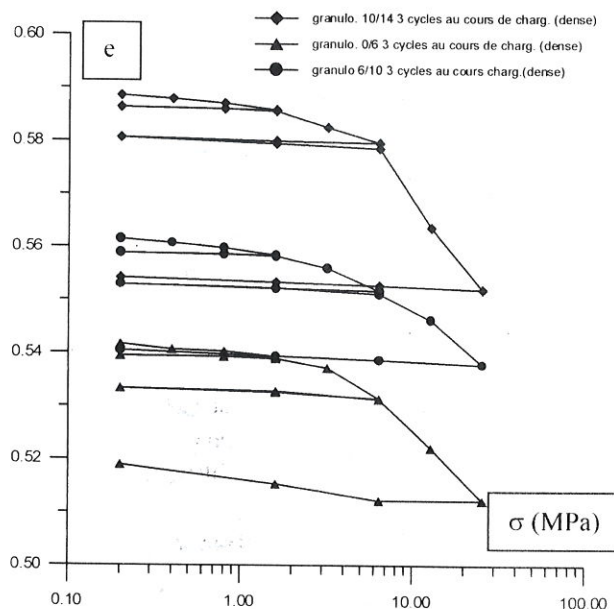


Figure1 : Courbes oedométriques à 3 cycles au cours du chargement pour les granulométries 0/6, 6/10 et 10/14.

On constate que le comportement de la pegmatite n'est pas réversible lors du déchargement, cependant dans la phase de recharge, le chemin est très peu différent du chemin de charge et retrouve la courbe initiale au point où l'on a amorcé la décharge pour le premier cycle. Plus on passe aux autres cycles plus la réversibilité s'accroît.

En comparant les résultats obtenus des essais oedométriques à 1 cycle à ceux obtenus à trois cycles pour la granulométrie 0/6, on constate que les valeurs des coefficients de l'indice de compression, de l'indice de gonflement et de la contrainte de préconsolidation, sont légèrement différentes. En effet, le matériau après trois cycles a perdu un peu de résistance. La valeur la plus importante est obtenue à l'état dense.

-Dans le second cas, les trois cycles sont réalisés au dernier palier. Les courbes obtenues sont présentées à la figure 2.

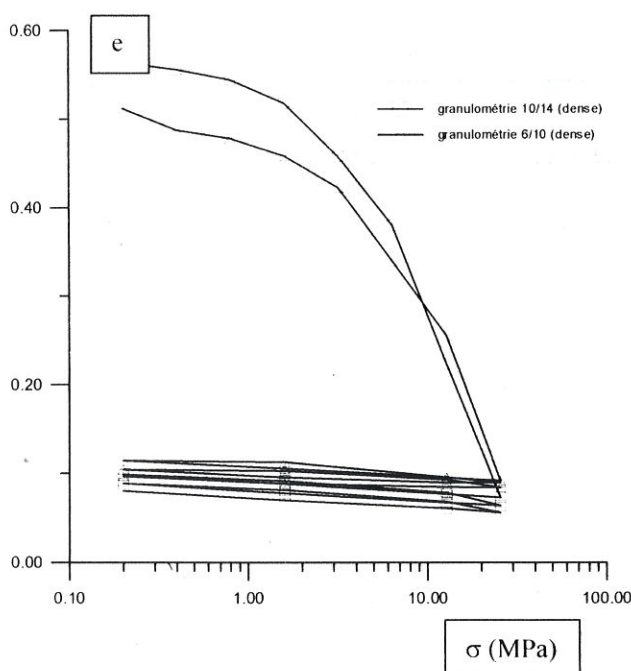


Figure 2 : courbes oedométriques à 3 cycles en fin de chargement pour les granulométries 6/10 et 10/14 à l'état dense.

On constate une certaine réversibilité pour la granulométrie 6/10; en effet dans la phase de recharge, le trajet est très peu différent du chemin de décharge et on retrouve la courbe initiale au point où l'on a amorcé la décharge. Par contre pour les granulométries 0/6 et 10/14, la réversibilité n'est pas parfaite et on constate que les variations de « e » et de « ε »

au cours de ces trois cycles sont de l'ordre de 2 % pour « e » et de 0.9 % pour « ε » pour la 10/14 et de 1 % pour « e » et de 0.7% pour « ε » pour la 0/6.

La différence entre les indices des vides des trois granulométries est très grande au début des essais. Après les cycles de chargement déchargement, la différence des valeurs de ces indices est de l'ordre du milliè; soit pratiquement le même indice des vides

5, DETERMINATION DES PARAMETRES DE COMPRESSIBILITE DE LA PEGMATITE

Les essais oedométriques sont effectués sur les trois granulométries du matériau pegmatite (0/6 ; 6/10 et 10/14). Les matériaux sont mis en place par déversement sans compactage et se trouvent ainsi dans un état lâche. Une deuxième série d'essais a été réalisée à l'état dense ; les matériaux sont mis en place avec un léger compactage à l'aide d'une dame permettant un meilleur réarrangement des grains. Et une troisième série, où les matériaux sont mis en place avec une teneur en eau optimale et avec une densité optimale, a aussi été réalisée.

Ces essais oedométriques ont pour objectif de simuler l'histoire des différentes éprouvettes aux trois états étudiés afin d'obtenir des valeurs plus fiables de la compressibilité de ce matériau. En fait cette compressibilité n'est que le résultat de la densification des échantillons - qui entraîne, suivant les contraintes appliquées, des modifications plus ou moins importantes de la structure telles que:

- *le serrage des grains les uns contre les autres, surtout pendant la phase initiale de chargement.

- *le glissement relatif des grains.

- *et aussi, la fragmentation des grains surtout aux points de contact lorsque l'échantillon est soumis à de fortes contraintes.

Des différentes courbes oedométriques obtenues, on déduit :

-L'indice de compression et de gonflement :

Les indices de compression et de gonflement sont calculés à partir des essais effectués. On peut trouver différentes valeurs de Cc en fonction de l'état et de la granulométrie de la pegmatite. Le coefficient Cc permet de



préciser la sensibilité du sol au tassement le long de cette courbe. Le tassement est d'autant plus important que le coefficient de compression est élevé.

La méthode proposée pour déterminer σ_c est simple: c'est celle de Casagrande.

Les résultats de ces paramètres sont regroupés dans les tableaux 5 et 6 suivants :

-La pression de préconsolidation :

C'est la pression maximale sous laquelle le sol s'est déjà consolidé au cours de son histoire.

Classe granulaire	0/6				6/10				10/16			
Coefficient Etat du sol	σ'_c (kPa)	C_c	C_g	Δh (mm)	σ'_c kPa	C_c	C_g	Δh (mm)	σ'_c kPa	C_c	C_g	Δh (mm)
Sec Lâche	150	0.23	0.033	5.755	220	0.41	0.017	9.814	350	0.528	0.028	9.92
Humide lâche	100.7	0.33	0.012	3.057	170	0.54	0.013	11.68	240	0.692	0.015	10.96
Dense	515	0.02	0.001	0.498	550	0.28	0.009	0.829	440	0.498	0.011	1.004

Tableau 5 : caractéristiques de la pegmatite soumise à l'essai oedométrique à trois cycles en fin de chargement.

Etat du sol	sec				humide				dense			
Coefficient Granulométrie	σ'_c kPa	C_c	C_g	Δh (mm)	σ'_c kPa	C_c	C_g	Δh (mm)	σ'_c kPa	C_c	C_g	Δh (mm)
10/14	264	0.53	0.014	9.82	227	0.55	0.015	8.85	430	0.04	0.001	0.706
6/10	225	0.39	0.011	3.436	86	0.52	0.012	4.352	410	0.03	0.005	0.598
0/6	133	0.14	0.010	2.717	40	0.33	0.017	2.376	340	0.028	0.001	0.517

Tableau 6 : caractéristiques de la pegmatite soumise à l'essai oedométrique à trois cycles au cours du chargement.

-Le module oedométrique : Le module oedométrique a pour expression $E_{oed} = - \Delta \sigma / \Delta e$, il représente la pente de la partie linéaire de la courbe de compressibilité. Il est ainsi déterminé pour chaque classe granulaire et les résultats sont présentés dans le tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Module oedométrique en fonction de la granulométrie et de l'état de compacité de la pegmatite.

Etat	Granulo	Eoed [kPa] 3 cycles au cours du chargement.	Eoed [kPa] 3 cycles en fin de chargement
Lâche	0/6	20129	18551
	6/10	7131	10407
	10/14	6037	5663
Humide	0/6	8548	8432
	6/10	6075	5163
	10/14	5783	4636
Dense	0/6	152381	182857
	6/10	71111	7619
	10/14	53333	8533

Les principales conclusions que l'on peut tirer de ces deux tableaux sont :

L'évolution de l'indice des vides en fonction des contraintes verticales en échelle logarithmique montre une compressibilité plus élevée pour les échantillons lâches. Nous constatons que l'indice des vides initial croît lorsque le diamètre des granulats constituant l'échantillon augmente. Plus cet indice des vides est important, plus la compressibilité du matériau est élevée. La déformation verticale obtenue présente une grande différence entre le matériau dense et lâche. Plus la contrainte est importante, plus cette différence est grande.

Dans le cas des valeurs de l'indice de compression, on obtient une différence très significative entre les trois granulométries. Cet indice évolue de la même façon que l'indice de compression et présente des valeurs plus élevées pour la granulométrie 0/6 que pour la 6/10 ou la 10/14. Quant à l'état de compacité, cet indice décroît de l'état sec à l'état humide et à l'état dense pour les trois granulométries. Par contre, la différence de déformation verticale est plus importante pour la granulométrie 10/14 que pour la 6/10 ou la 0/6. Nous expliquons ceci par un réarrangement ou un écrasement des grains de la granulométrie 10/14.

Pour l'indice de gonflement, ce dernier présente des valeurs très faibles de l'ordre du centième pour les trois états étudiés et ce quelle que soit la granulométrie. Notre matériau ne présente pratiquement pas de gonflement.

Pour la contrainte de préconsolidation, elle évolue de l'état lâche à l'état humide puis à l'état dense et cela quelle que soit la granulométrie. Cette contrainte est donc plus importante à l'état dense qu'aux autres états. Elle prend la valeur la plus importante pour la granulométrie 0/6 à l'état dense.

D'après le tableau 7, le module oedométrique diminue en fonction de la granulométrie pour tous les états (lâche, dense ou humide). Or d'après CAMBOU (1972) la déformation de l'échantillon est due essentiellement au réarrangement des particules, ce réarrangement est plus facile pour les petites particules ; le module oedométrique est donc plus grand pour les petites particules, ce qui confirme nos résultats.

6, APPLICATION DE LA RELATION DE COMPRESSIBILITE DE CAMBOU AU MATERIAU PEGMATITE

CAMBOU (1972) a essayé de déterminer la déformation d'un ensemble de particules à partir de la déformation d'une seule particule. Pour ceci il a réalisé des compressions d'une ou deux particules suivant différentes orientations, ainsi qu'un certain nombre d'essais oedométriques sur des ensembles de particules. Les essais ont mis en évidence que la déformation d'une particule dépend essentiellement des surfaces de contact avec les autres particules et que pour une déformation donnée, la déformation de l'ensemble est beaucoup plus importante que la déformation de la particule seule. Ceci s'explique par le fait que la déformation de l'éprouvette est due en partie au réarrangement de l'ensemble des particules, phénomène qui n'intervient pas dans la déformation d'une seule particule. Il est donc difficile de déterminer la loi effort – déformation d'un ensemble de particules à partir de la loi effort déformation d'une particule.

Par ailleurs, à partir des résultats d'essais oedométriques provenant de plusieurs chercheurs, CAMBOU a proposé la loi empirique (1) ci-après qui permet d'étudier l'influence de la granulométrie, de l'indice des vides et de la teneur en eau sur le déroulement du phénomène de tassement:

$$e = e_0 - \beta \sigma^m \dots\dots\dots(1)$$

e : Indice des vides du milieu pulvérulent soumis à la contrainte σ .

e_0 : Indice des vides initial.

Dans le cas d'essais oedométriques, " β " peut s'écrire sous forme :

$$\beta = 10^{-4} 10^{\delta \alpha_n} \dots\dots\dots(2)$$

δ : Facteur dépendant de la forme et de la dimension des particules, il est égal à 2.2 pour les sables fins ou grossiers et à 4 pour les sables silteux.

A partir des essais oedométriques réalisés sur le matériau pegmatite, nous allons déterminer les paramètres de la loi de CAMBOU « m ; β ; δ ».

La relation peut s'écrire sous la forme suivante $\text{Log}(e_0 - e) = m \log \sigma + \log \beta \dots\dots\dots(3)$

Ainsi pour les différentes granulométries et pour les trois états de la pegmatite étudiée, on trace les variations de $\text{Log}(e_0 - e)$ en fonction des variations de $\log \sigma$ (figure 3), les pentes des droites obtenues donnent les valeurs « m » et leurs ordonnées à l'origine les valeurs de $\log \beta$. Les valeurs des différents paramètres sont regroupées dans les tableaux 8 et 9.

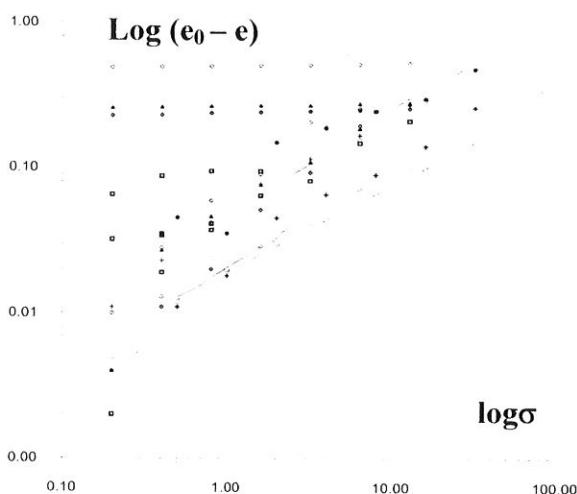


Figure 3 : paramètres de CAMBOU sur le matériau pegmatite à différentes granulométries et à différents états de compacité.

Tableau 8: détermination des paramètres de la loi de CAMBOU pour les essais réalisés à un cycle

Etat du matériau	Granul	β	m	δ
Lâche	0/6	$1.119 \cdot 10^{-4}$	0.59	0.129
	6/10	0.0169	0.46	2.408
	10/14	$1.29 \cdot 10^{-4}$	0.73	0.114
Dense	0/6	$2.824 \cdot 10^{-3}$	0.54	4.424
	6/10	$1.29 \cdot 10^{-4}$	0.73	0.159
	10/14	$5.304 \cdot 10^{-4}$	0.89	0.922
Humide	0/6	$1.77 \cdot 10^{-3}$	0.53	2.717
	6/10	$3.04 \cdot 10^{-3}$	0.53	1.745
	10/14	$7.78 \cdot 10^{-4}$	0.75	1.024

Tableau 9: détermination des paramètres de la loi de CAMBOU pour les essais réalisés à trois cycles au cours du chargement pour la granulométrie 0/6.

Etat du matériau	e_0	β	m	δ
Lâche	0.766	$1.172 \cdot 10^{-3}$	0.58	1.396
Dense	0.4	$1.297 \cdot 10^{-4}$	0.67	1.396
Humide	0.887	$1.729 \cdot 10^{-3}$	0.61	0.283

Les valeurs de m et δ prennent des valeurs différentes en fonction de la classe granulaire et en fonction de l'état du matériau. En effet m et δ évoluent dans le sens contraire ; lorsque m augmente avec la compacité, δ diminue et cela quelque soit la classe granulaire. En présence d'eau, les paramètres m et δ sont modifiés, ainsi sous l'effet de l'eau m augmente aussi bien pour la granulométrie 0/6 que pour la 6/10 ou la 10/14. Par contre δ a un effet contraire.

Les mêmes conclusions sont à retenir pour les essais oedométriques à trois cycles au cours du chargement. Il faut en outre remarquer que le nombre de cycles a modifié notablement les valeurs de m et δ et plus le matériau est dense et plus le nombre de cycles influe sur ces paramètres.

CONCLUSION

Les résultats obtenus à l'essai oedométrique sur le matériau pegmatite en faisant varier la granulométrie, l'état de compacité et le nombre de cycles nous ont permis de conclure :

Que le matériau pegmatite est caractérisé par des valeurs élevées d'indice de vides « e » et que l'influence de la granulométrie et de la compacité sont importantes. Quant à la présence d'eau, elle s'est manifestée par une augmentation de la compressibilité du matériau.

Que le nombre de cycles modifie les caractéristiques du modèle de CAMBOU ; mais tous les essais semblent suivre sa loi empirique et cela quelle que soit la granulométrie et l'état de compacité de la pegmatite.

BIBLIOGRAPHIE :

H. JOSSEAUME, I. O. HIENG et J. P. STEMPELET, « Détermination des paramètres de compressibilité d'une argile raide à partir d'essais oedométriques à haute pression ». *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.* – **172** – Mars-avril 1991.

M. JRAD, « Etude expérimentale du comportement mécanique des granulats calcaires ». *Thèse de Doctorat de l'INPL de Nancy 1993 (France)*.

B. MELBOUCI, « influence des cycles de chargement déchargement au triaxial sur l'état des grains du matériau pegmatite ». *Séminaire National de Génie civil 15 et 16 Mai 2001 Sidi Bel-Abbès*.