

IMPACT DE LA TEMPÉRATURE SUR LE FLUAGE D'UNE ARGILE COMPACTÉE SATURÉE

TEMPERATURE IMPACT ON THE CREEP BEHAVIOR OF A SATURATED COMPACTED CLAYEY SOIL

Zayad Kaddouri, Olivier Cuisinier, Farimah Masrouri

LEMTA-UMR 7563, CNRS - Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

RÉSUMÉ – L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact de la température sur le fluage d'une argile compactée. Un dispositif nouveau a été développé permettant le contrôle de la température entre 5 et 70°C. Les résultats montrent que l'augmentation de température entraîne une diminution de la pression de préconsolidation. En revanche, le coefficient de fluage augmente de 14% quand la température augmente de 5 à 70°C.

ABSTRACT – The objective of this study is to investigate the temperature impact on the creep behavior of a compacted clay. A new device has been developed to control the temperature from 5 to 70°C. The results showed that the preconsolidation pressure decreases with temperature increase. However, the creep coefficient increases by 14% when the temperature increases from 5 to 70°C.

1. Introduction

Dans certaines applications telles que les structures géothermiques, le stockage de chaleur dans les remblais, le stockage des déchets radioactifs et l'enfouissement des câbles à haute tension, l'impact des variations de température sur le comportement du sol doit être pris en compte. En effet, ces variations pourraient avoir une incidence sur l'évolution des propriétés hydromécaniques, notamment la compressibilité et le fluage de ces matériaux et par conséquent altérer les performances à long terme de ces structures.

Le fluage correspond à une déformation à contrainte effective constante, due à un réarrangement interne de la structure, caractérisée par le coefficient de fluage $C_{\alpha e}$. De nombreuses études ont montré que ce coefficient variait avec la contrainte effective. MacFarlane (1959) et Marshall (1960) ont montré que pour une kaolinite, ce coefficient augmente linéairement avec la contrainte effective : une augmentation de 50% a été mesurée quand la contrainte varie de 300 à 800 kPa. Dans le cas des argiles intactes, $C_{\alpha e}$ augmente avec la contrainte, la valeur maximale étant atteinte pour une contrainte de l'ordre de grandeur de la contrainte de préconsolidation, pour ensuite diminuer (Walker et Raymond (1968) ; Mesri et Godlewski (1977)).

Seuls quelques travaux ont été effectués afin d'évaluer l'impact de la température sur le fluage des sols. Dans le cas d'une argile sensible, Gupta (1964) a constaté que le coefficient de fluage $C_{\alpha e}$ augmente avec la température dans un intervalle de 20 à 45°C. Une série d'essais de fluage sur des sols argileux dans une gamme de température de 5 à 60°C a également montré que plus la température est élevée, plus le coefficient de fluage est élevé (Eriksson 1992). Les résultats des essais œdométriques de fluage sur l'argile de Bryce à différentes températures (de 5 à 50°C) ont montré que le coefficient de fluage dépend à la fois de la contrainte effective et de la température. Le paramètre $C_{\alpha e}$ est plus affecté par la température à des contraintes effectives plus faibles (Green 1969). Zhang et al. (2007) ont suggéré que l'augmentation du coefficient de fluage à haute

température, de l'ordre de 50°C, était due à l'impact de la température sur les liaisons interparticulaires, ou à la diminution de la résistance au cisaillement entre les particules.

La plupart de ces travaux est axée principalement sur les argiles naturelles, parfois légèrement cimentées. En revanche, pour les sols compactés, rares sont les études réalisées sur les effets de la température sur la consolidation à court et à long terme. L'objectif de ce travail est donc de s'intéresser principalement à l'effet de la variation de la température sur le processus de consolidation secondaire des sols fins compactés.

Des œdomètres à température contrôlée ont été développés pour réaliser des essais de fluage par paliers sur des éprouvettes compactées saturées, pour des contraintes effectives verticales allant de 10 à 1300 kPa dans une gamme de température comprise entre 5 et 70°C. Le coefficient de fluage $C_{\alpha e}$ a été déterminé pour chaque palier de chargement, différentes relations entre $C_{\alpha e}$ et d'autres paramètres tels que la contrainte effective (σ'_v), la durée du palier de fluage ($(t-t_{100})/t_{100}$) et l'indice de compression (C_c) sont également analysées.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractéristiques des matériaux

L'étude a été réalisée sur un sol argileux prélevé dans l'Est de la France. Le sol étudié est composé de 35,9% de minéraux argileux, 46,3% de quartz, 9,9% de calcite, 4,3% de feldspath, 3% de plagioclase et 0,6% de gypse. Les minéraux argileux du matériau, déterminés par diffraction des rayons X, sont la kaolinite (38,4%), l'illite (26,5%), l'illite-smectite interstratifiée (26,2%) et la chlorite (8,9%). Les limites d'Atterberg ont été déterminées, la limite de liquidité (w_L) est de 43,5%, la limite de plasticité (w_P) est de 19,7% avec un indice de plasticité I_p de 23,8%, et une masse spécifique des grains de 2,65 Mg/m³. La masse volumique sèche maximale déterminée à partir de la courbe Proctor normal, est de 1,74 Mg/m³ avec une teneur en eau optimale de 16,5%. Le matériau étudié est classé A2 selon la norme française pour la classification des sols.

2.2. Préparation des éprouvettes

La poudre sèche du sol (< 400 µm) a été mélangée et humidifiée avec de l'eau déminéralisée à la teneur en eau optimale. Le mélange a ensuite été stocké dans un sac hermétique à 20°C pendant 24 h pour atteindre une bonne homogénéisation du matériau. Ensuite, les éprouvettes de sol ont été compactées statiquement dans des anneaux des cellules œdométriques jusqu'à la densité sèche maximale. Les dimensions des éprouvettes sont de 50 mm de diamètre et de 10 ± 0,1 mm de hauteur. L'indice des vides initial déterminé à 20°C est de l'ordre de 0,525.

2.3. Dispositif expérimental et protocole

Un dispositif œdométrique avec système de contrôle de température a été développé pour effectuer des essais de fluage et étudier les effets des contraintes verticales et de la température sur les sols (Figure 1). La charge est appliquée grâce à un système à air comprimé. La contrainte verticale maximale est de 1300 kPa. Le déplacement vertical de l'éprouvette a été mesuré à l'aide de capteurs LVDT avec une précision de 0,01 mm. L'imposition de la température a été effectuée en utilisant une chambre climatique à hygrométrie contrôlée qui permet d'appliquer des températures allant de 5 à 100°C avec une précision de ± 0,7°C. La température est continuellement enregistrée et contrôlée pendant l'essai par un capteur de température connecté à la cellule, à proximité de l'éprouvette. Le système comprend également un contrôleur de volume-pression pour contrôler la pression de l'eau interstitielle à la base de l'éprouvette.

L'éprouvette compactée dans la cellule œdométrique a été mise en place sur le bâti de l'œdomètre. Une contrainte verticale initiale constante de 10 kPa a été appliquée pour assurer le contact du piston de chargement avec l'éprouvette. De l'eau désaérée et déminéralisée a ensuite été injectée à l'éprouvette à travers l'élément poreux à une pression constante de 10 kPa. Cette pression a été appliquée et maintenue pendant tout l'essai. Le niveau de saturation du matériau a été vérifié selon le protocole développé par Jarad et al. (2017), en mesurant le volume d'eau injecté comme une fonction linéaire du temps (sur une longue période) et ensuite en calculant le degré de saturation de l'échantillon à la fin de l'essai. La saturation a été généralement atteinte en sept jours. Une fois, la déformation de gonflement vertical de l'éprouvette à cette contrainte verticale initiale (10 kPa) et à la température désirée stabilisée, le chargement par paliers a démarré.

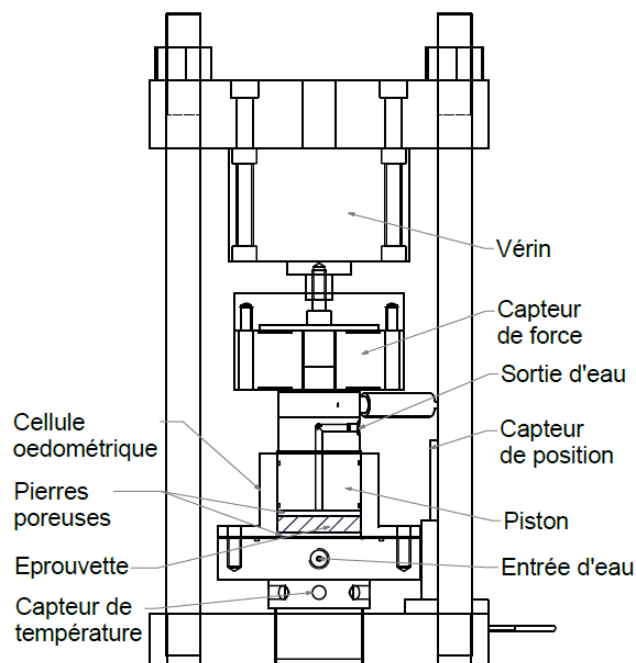


Figure 1. Schéma de l'œdomètre (placé dans la chambre à température contrôlée).

2.4. Programme expérimental

Le programme comprend deux séries d'essais (Tableau 1).

- Série n°1 : essais TE1a à TE4b pour déterminer les paramètres de compressibilité (C_c , C_g et σ'_p) et évaluer l'effet de la température sur ces paramètres. Les éprouvettes ont été chargées par paliers (de 10 à 1280 kPa), puis les paliers de déchargement ont été effectués. Chaque palier de chargement et de déchargement a été maintenu jusqu'à la fin de la consolidation primaire (t_{100}). Les essais réalisés à 5, 50 et 70°C ont été effectués deux fois pour vérifier la répétabilité des résultats.

- Série n°2 : essais TE5 à TE9 pour déterminer le coefficient de fluage $C_{\alpha e}$ et pour étudier l'impact de la contrainte verticale effective et de la température sur $C_{\alpha e}$. Les éprouvettes ont été chargées par paliers jusqu'à une contrainte verticale donnée (10, 16 et 30 kPa). Ensuite, les paliers de fluage ont été effectués pendant 10 jours sous différentes contraintes verticales effectives (de 80 à 1280 kPa). À la fin du palier de fluage de 1280 kPa, des paliers de déchargement ont été appliqués jusqu'à 10 kPa. Les paliers de chargement et de déchargement ont été maintenus jusqu'à la fin de la consolidation primaire (t_{100}). Les températures appliquées sont 5, 20, 50 et 70°C.

Tableau 1. Liste des essais œdométriques à température contrôlée

Caractéristiques des essais thermomécaniques				Paramètres de compressibilité			Coefficient de fluage
N° Série	Température (°C)	Contrainte appliquée (kPa)	Durée de palier	C_c (-)	C_g (-)	σ'_p (kPa)	C_{ae} (-)
1	5 - 20 - 50 - 70	10 - 1280	t_{100}	✓	✓	✓	-
2	5 - 20 - 50 - 70	80 - 1280	10 jours	-	-	-	✓

3. Résultats

3.1. Effet de la température sur la compressibilité

L'indice de compression (C_c), l'indice de gonflement (C_g) et la pression de préconsolidation apparente (σ'_p) ont été déterminés à 20°C. La pression de préconsolidation apparente a été déterminée en utilisant la méthode de Casagrande (Figure 2a).

Pour vérifier la répétabilité, deux essais œdométriques ont été réalisés à chaque fois à 5, 50 et 70°C suivant le même programme de chargement. Les deux courbes obtenues à la même température sont très similaires démontrant la bonne répétabilité des essais (Figure 2b et Tableau 2).

L'augmentation observée de l'indice des vides sous la contrainte verticale initiale correspond au gonflement induit par la saturation de l'éprouvette. Cette augmentation est caractérisée par le potentiel de gonflement ($\Delta h/h_0$). Ce paramètre diminue à des températures plus élevées ; par exemple, de 6,9% à 1,1% quand la température augmente de 20 à 70°C.

La Figure 2b montre également que le comportement du sol évolue avec la température. Ainsi, lorsque la température du sol augmente, la pression de préconsolidation apparente σ'_p diminue (Tableau 2 et Figure 3). Par exemple, la pression de préconsolidation apparente σ'_p diminue de 14,9% quand la température passe de 5 à 70°C. Ce qui correspond à un écrouissage négatif ou un radoucissement du sol. La Figure 3 montre la variation des indices de compression et de gonflement avec la température. D'après les résultats expérimentaux obtenus, résumés au Tableau 2, il apparaît que la température a un effet négligeable sur les indices de compression et de gonflement.

Tableau 2. Influence de la température sur C_c , C_g et σ'_p .

T (°C)	$\Delta h/h_0$ (%)	C_c (-)	C_g (-)	σ'_p (kPa)
5	4,79	0,163	0,008	68,4
5	4,84	0,155	0,011	67,9
20	6,70	0,172	0,005	66,5
20	6,85	0,160	0,013	65,1
50	3,43	0,161	0,006	62,6
50	3,51	0,162	0,005	62,0
70	1,10	0,158	0,004	58,0
70	1,29	0,158	0,004	58,0

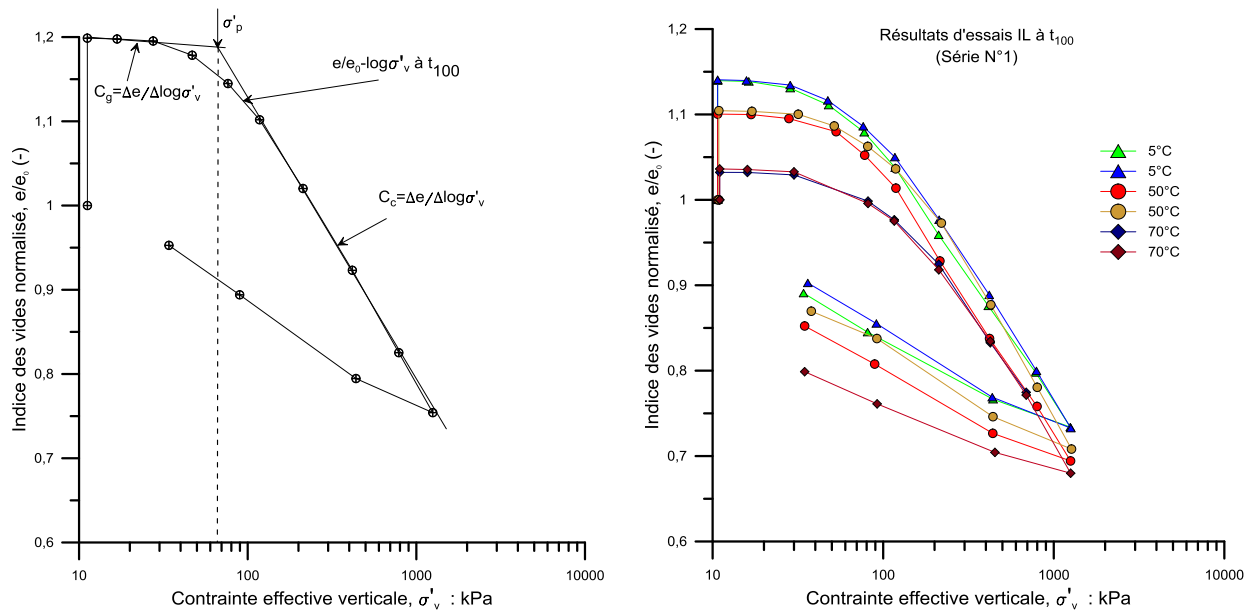


Figure 2. Courbes de compressibilités à t_{100} : (a) e -log σ'_v à 20°C ; (b) e -log σ'_v à 5, 50 et 70°C.

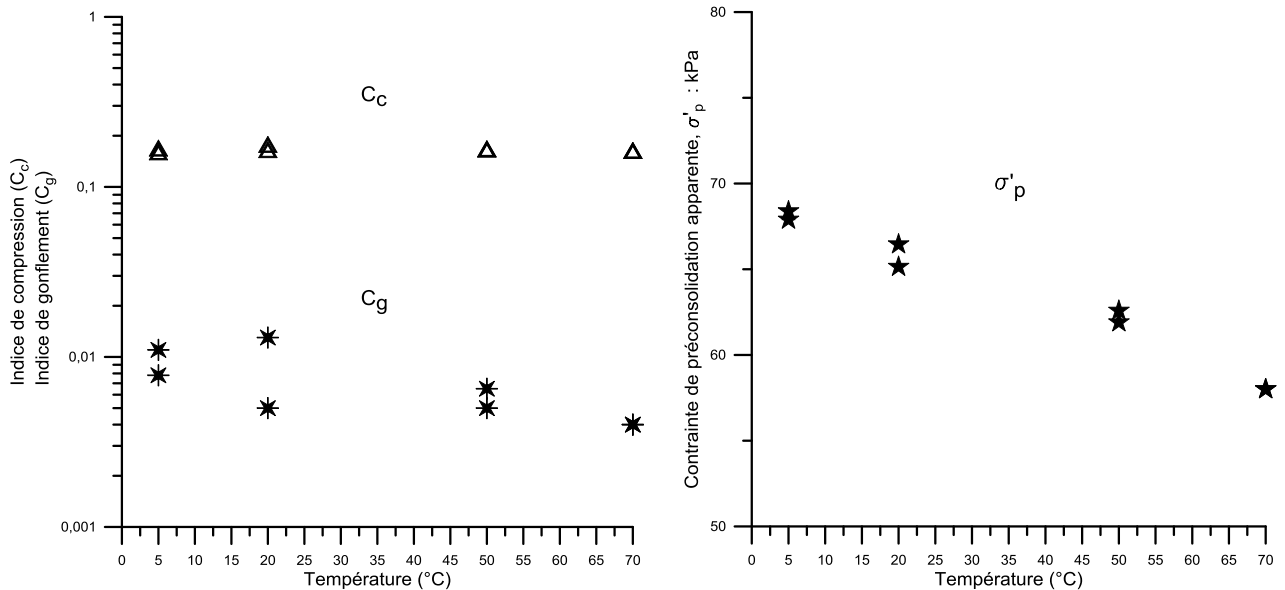


Figure 3. Effet de la température sur les paramètres de compressibilité : indice de gonflement, indice de compression et contrainte de préconsolidation apparente.

3.2. Effet de la température sur la consolidation à long terme (fluage)

3.2.1. Détermination du coefficient de fluage

Pour rappeler la méthode d'identification du coefficient de fluage utilisée dans cette étude, un exemple de courbe de consolidation, variation de l'indice des vides avec le logarithme du temps (e -log t), à 1280 kPa est présenté sur la Figure 4. La consolidation peut être divisée en deux phases : (1) la consolidation primaire, due à la dissipation de l'excès de pression interstitielle, et (2) la consolidation secondaire attribuée au fluage, déformation qui se produit à contrainte effective constante. La consolidation secondaire après t_{100} est caractérisée par le coefficient de fluage C_{ae} exprimé par Eq. (1)

$$C_{ae} = \frac{\Delta e}{\Delta \log(t)} \quad (1)$$

où Δe est la variation de l'indice des vides, et $\Delta \log(t)$ est la variation dans le temps.

3.2.2. Effet de la contrainte verticale effective sur le coefficient de fluage

La Figure 5 montre la relation entre $C_{\alpha e}$ et le temps pendant la compression secondaire en fonction de la contrainte verticale effective appliquée. $C_{\alpha e}$ décroît considérablement avec le temps au début du fluage puis se stabilise à $(t-t_{100}) / (t_{100})$ proche de 100, ce qui correspond à 14000 min (environ 10 jours). Par conséquent, 10 jours suffisent pour déterminer $C_{\alpha e}$. Il a été constaté que $C_{\alpha e}$ décroît d'une façon plus marquée à 1280 kPa par rapport à 680 kPa. Il peut aussi être observé que $C_{\alpha e}$ varie en fonction de la contrainte verticale, où la déformation due au fluage augmente avec l'augmentation de la contrainte effective. Ces résultats confirment la dépendance de $C_{\alpha e}$ à la fois du temps et de l'intensité de la contrainte effective pour des sols compactés.

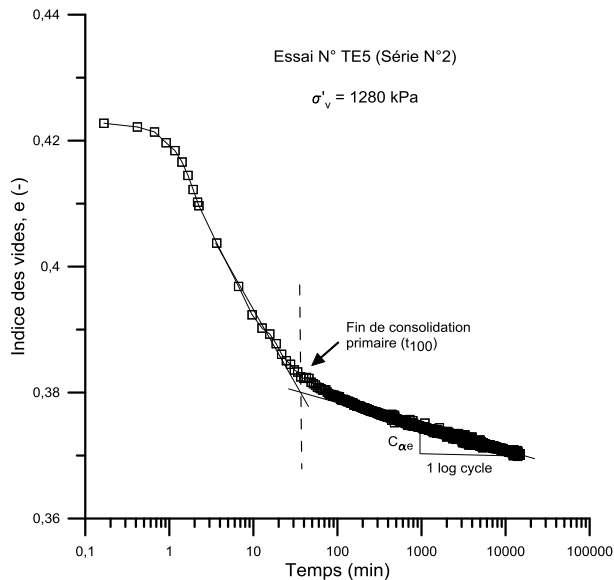


Figure 4. Courbe de consolidation (e -log t) à 20°C.

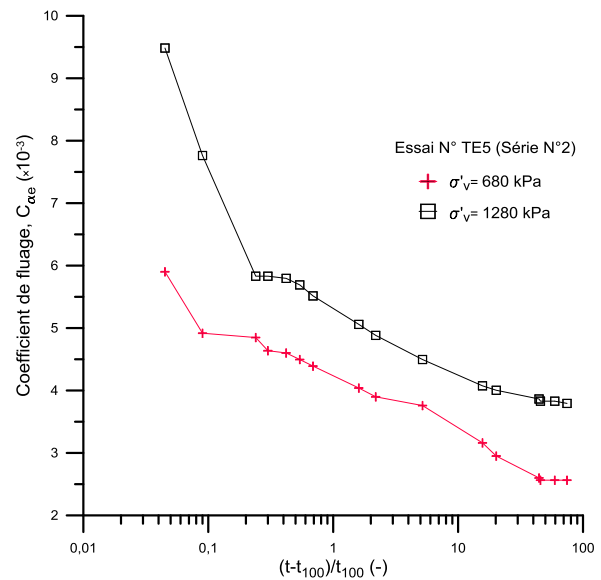


Figure 5. Évolution de $C_{\alpha e}$ avec le niveau de contrainte en fonction de $\log (t-t_{100})/t_{100}$ à 20°C.

3.2.3. Effet de la température sur le coefficient de fluage

Sous une contrainte verticale effective constante, la durée de chaque palier de fluage était supérieure à dix jours. Les valeurs de $C_{\alpha e}$ ont été déterminées comme mentionné dans 3.2.1.

Les résultats montrent que $C_{\alpha e}$ augmente avec l'augmentation de la contrainte verticale et de la température, en particulier sous des contraintes verticales effectives plus élevées (Figure 6).

Pour analyser davantage l'effet de la température, les valeurs de $C_{\alpha e}$ pour les contraintes les plus élevées sont comparées. Une augmentation du coefficient de fluage avec l'augmentation de la température peut être observée lorsque la contrainte effective augmente de 680 à 1280 kPa (Figure 7). Ainsi, à titre d'exemple, pour la contrainte verticale effective de 1280 kPa, le pourcentage d'augmentation de $C_{\alpha e}$ est de 13,6% lorsque la température augmente de 5 à 70°C. Ces résultats confirment que le $C_{\alpha e}$ dépend à la fois de la contrainte verticale effective et de la température.

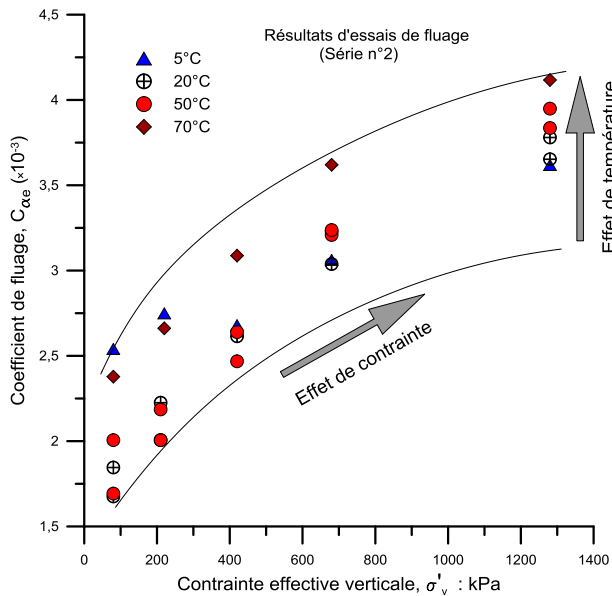


Figure 6. $C_{\alpha e}$ en fonction de σ'_v à différentes températures.

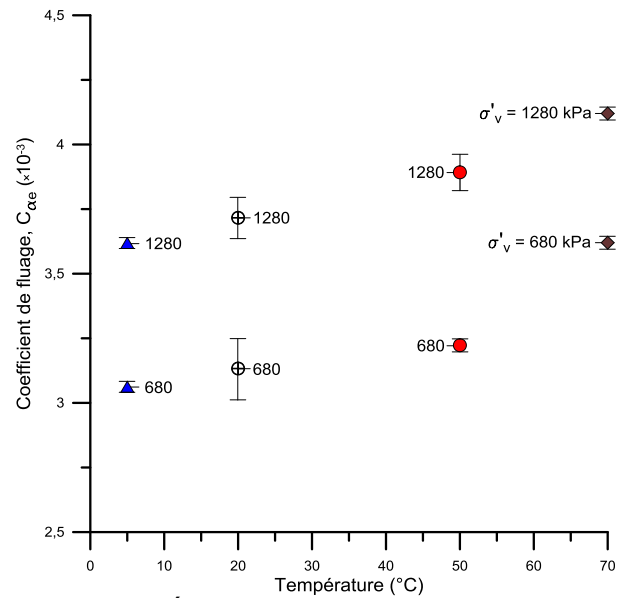


Figure 7. Évolution de $C_{\alpha e}$ avec la température à $\sigma'_v = 680$ kPa and $\sigma'_v = 1280$ kPa.

3.3. Effet de la température sur le rapport $C_{\alpha e}/C_c$

Pour évaluer le rapport $C_{\alpha e}/C_c$ du matériau étudié ainsi que sa dépendance à la température, pour chaque essai de fluage à température contrôlée, la valeur maximale de $C_{\alpha e}$ qui correspond à la contrainte verticale effective la plus élevée (1280 kPa) a été sélectionnée. La relation entre le maximum de $C_{\alpha e}$ et C_c pour chacune des quatre températures montre que le rapport $C_{\alpha e}/C_c$ varie dans une gamme étroite de 0,02 à 0,03. Le Tableau 3 résume les valeurs du rapport $C_{\alpha e}/C_c$ à différentes températures, elles se situent dans l'intervalle de 0,02-0,06 proposé par Mesri et Godlewski (1977) pour un certain nombre de limons et d'argiles inorganiques. Les résultats obtenus montrent également que le rapport $C_{\alpha e}/C_c$ augmente avec l'augmentation de température. Ceci indique que le rapport $C_{\alpha e}/C_c$ du sol compacté étudié dépend de la température.

Leroueil et al. (1985) ont montré que le coefficient α , pente de la variation de la pression de préconsolidation (σ'_p) avec la vitesse de déformation ($\dot{\epsilon}_v$), est égale au rapport $C_{\alpha e}/C_c$. Par conséquent, pour un sol donné dont le rapport $\Delta \log(\sigma'_p)/\Delta \log(\dot{\epsilon}_v)$ est connu, le coefficient de consolidation secondaire $C_{\alpha e}$ peut être déterminé.

Tableau 3. Influence de la température sur C_c , $C_{\alpha e}$ et le rapport $C_{\alpha e}/C_c$ à $\sigma'_v = 1280$ kPa.

T (°C)	C_c (-)	$C_{\alpha e} (\times 10^{-3})$	$C_{\alpha e}$ (-)	$C_{\alpha e}/C_c$ (-)
5	0,163	3,619	0,0036	0,022
20	0,172	3,780	0,0038	0,022
50	0,161	3,949	0,0040	0,025
70	0,158	4,112	0,0041	0,026

4. Conclusion

L'impact de la contrainte effective et de la température sur le comportement au fluage d'un sol argileux compacté saturé a été étudié expérimentalement en effectuant une série d'essais œdométriques à température contrôlée. Les points suivants peuvent être retenus.

- L'indice de compression (C_c) et l'indice de gonflement (C_g) varient légèrement ($0,16 \pm 0,01$) dans la gamme des températures étudiées.
- La pression de préconsolidation apparente (σ'_p) dépend de la température, lorsque la température du sol augmente, la pression de préconsolidation apparente σ'_p diminue et un écoulement négatif a lieu.

- Le coefficient de fluage $C_{\alpha e}$ est à la fois dépendant de l'intensité de contrainte et de la température. $C_{\alpha e}$ augmente linéairement avec l'augmentation des contraintes verticales effectives. De même, $C_{\alpha e}$ augmente avec l'augmentation de la température, en particulier à des contraintes verticales effectives élevées.

- Le concept de rapport constant ($C_{\alpha e}/C_c$) peut être appliqué aux matériaux compactés. Ce rapport $C_{\alpha e}/C_c$ peut être considéré dépendant de la température dans la gamme de température étudiée.

- Ces résultats complètent une base de données pour modéliser le comportement des structures constituées de sols compactés sous l'effet des variations thermiques à long terme.

Du point de vue expérimental, ces résultats devraient être complétés par des essais cycliques de chauffage / refroidissement pour étudier l'impact de la variation de la température sur le comportement de consolidation et de fluage des argiles compactées.

5. Références bibliographiques

- Eriksson L. G. (1992). "Compression Properties of Sulphide soils—Influence from time and temperature, a laboratory study". Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Sweden. 151 pages.
- Green W.J. (1969). "The Influence of Several Factors on the Rate of Secondary Compression of Soil." Master's thesis. Missouri-Holla, Holla, Missouri, 49 pages.
- Gupta B. (1964). "Creep of Saturated Soil at Different Temperatures." Thèse de Doctorat. University of British Columbia, Canada, 81 pages.
- Jarad N., Cuisinier O., Masrouri F. (2017). "Effect of Temperature and Strain Rate on the Consolidation Behaviour of Compacted Clayey Soils." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Taylor & Francis, pp. 1–18.
- Leroueil S., Kabbaj M., Bouchard R., Tavenas F. 1985. "Stress–strain–strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays." *Géotechnique* 35 (2), pp. 159–180.
- MacFarlane J W. (1959). "Effect of Structure on Secondary Compression of Kaolinite." Master thesis. University of Florida, 66 pages.
- Marshall P.W. (1960). "Permeability Studies on Selected Saturated Clays." *A High Honors Project under a Fellowship from the National Science Foundation*. University of Florida, 37 pages.
- Mesri G., Godlewski P.M. (1977). "Time and Stress Compressibility Interrelationship." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 103 (5), pp. 417–430.
- Walker L. K., Raymond G.P. (1968). "The Prediction of Consolidation Rates in a Cemented Clay." *Canadian Geotechnical Journal* 5 (4), pp. 192–216.
- Zhang C.L., Rothfuchs T., Su K., Hoteit N. (2007). "Experimental Study of the Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Indurated Clays." *Physics and Chemistry of the Earth* 32 (8), pp. 957–965.