

## EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET TEXTURALES DE MATERIAUX ARGILEUX SOUS L'EFFET DE SOLLICITATIONS THERMIQUES

### MECHANICAL PROPERTIES OF CLAYEY SOILS AND THERMAL SOLICITATIONS

V. NOROTTE\*, M. AUDIGUIER\*, J. BILLIOTTE\*, J.Y. BOISSON\*\*

\* Centre de Géologie de l'Ingénieur, commun à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, PARIS - FRANCE

\*\*Institut de Protection et Sécurité Nucléaire, Département de Protection de l'Environnement et des Installations, IPSN - CEA, 92265 FONTENAY AUX ROSES, FRANCE.

BPG

Cedex

**RESUME** : L'évolution de la perméabilité et des caractéristiques mécaniques de trois matériaux argileux en fonction de la température a été étudiée en utilisant une cellule oedométrique spécifique. Le mode d'action d'une sollicitation thermique sur le comportement et la texture de ces matériaux est précisé.

**ABSTRACT** : Changes in permeability and mechanical properties of three clayey soils with temperature have been studied by using a special oedometric cell. The action of a thermal solicitation on the fabric and the behaviour of the samples is highlighted.

### 1. INTRODUCTION

Un stockage de déchets doit assurer le confinement des déchets entreposés et, en particulier les isoler des eaux souterraines ou superficielles par le biais desquelles des éléments toxiques peuvent migrer. Ces fonctions peuvent être assurées soit par la roche hôte, soit par des barrières ouvragées, ou par les deux : c'est alors le concept d'un stockage multi-barrières. Elles doivent aussi être assurées sur de très (très) longues durées ainsi que sous l'action de diverses sollicitations externes ou internes. Ces sollicitations peuvent être mécaniques ou thermiques comme dans le cas de stockages de certains types de déchets radioactifs. Dans ce dernier cas, la sollicitation thermique se présente sous la forme d'une phase d'augmentation de la température suivie d'une phase de décroissance de celle-ci.

La réalisation d'un stockage de déchets dans une formation argileuse ou l'incorporation de matériaux argileux dans des barrières ouvragées est en rapport direct avec les propriétés d'imperméabilité et de plasticité de ces matériaux et les capacités de fixation des minéraux argileux. Leur "imperméabilité" est due à la très petite taille des particules argileuses qui définissent un milieu poreux très fin où les pertes de charges sont très importantes et, aux interactions eau-particules qui réduisent la mobilité de l'eau interstitielle. En contre-partie, les liaisons entre particules, qui sont assurées par des actions à distance sont faibles, d'où les propriétés de plasticité et de compressibilité de ces matériaux. Chaque sollicitation externe induit un réarrangement des particules argileuses de telle sorte que les forces internes dues aux interactions particules-particules et eau-particules équilibrent les forces externes. Dans le cas d'une sollicitation mécanique, c'est le phénomène bien connu de tassement. Ce mécanisme d'équilibrage des sollicitations externes par réarrangement des particules argileuses est fortement irréversible. Ceci signifie, en particulier dans le cas d'une sollicitation thermique, que si la sollicitation est supprimée, le matériau ne revient pas dans un état proche de son état initial et qu'il peut alors présenter des propriétés très différentes de celles qu'il possédait initialement.

Pour préciser ces écarts en fonction des sollicitations thermiques imposées et des caractéristiques géotechniques des matériaux, une étude expérimentale sur des matériaux argileux de subsurface a été entreprise.

### 2. CARACTERISATION MECANIQUE DES MATERIAUX ARGILEUX.

Le comportement des matériaux argileux sous l'effet de sollicitations mécaniques est bien connu et a été très largement étudié in situ et en laboratoire. L'essai le plus simple qui permet cette étude est l'essai oedométrique qui consiste à appliquer une charge, maintenue constante dans le temps, sur une éprouvette cylindrique sertie dans une bague métallique afin que la déformation soit uniquement verticale. Suite à une telle sollicitation, la déformation de l'éprouvette est différée dans le temps. Cette déformation peut se décomposer en trois phases successives. On observe d'abord un tassement "instantané" qui correspond à la compression du matériau en condition non drainée. La déformation observée est essentiellement liée à la compressibilité du fluide interstitiel qui sous l'action de la charge est mis en pression.

En raison des dispositifs de drainage de la cellule, il se crée alors un gradient hydraulique dans l'éprouvette qui génère un écoulement vers les frontières drainantes et qui permet une dissipation des pressions interstitielles. Il se produit simultanément un transfert de contrainte du fluide sur les particules, d'où un réarrangement textural qui se traduit par un tassement. La dépendance entre pression interstitielle et contrainte effective est exprimée par la relation de THERZAGHI :  $\sigma = \sigma' + u$ . En raison de la faible perméabilité des matériaux argileux, cette phase de consolidation n'est pas instantanée. Sa durée est classiquement déterminée graphiquement sur les courbes tassement-logarithme du

temps ou tassement-racine carrée du temps. Cette durée dépend des caractéristiques physico-mécaniques du matériau, des conditions de chargement et de drainage et des rapports qui existent entre ces facteurs internes et externes. Le coefficient de consolidation  $C_v$ , qui apparaît dans la théorie de la consolidation de THERZAGHI, fondée sur un comportement élastique du squelette du matériau, caractérise la cinétique de la phase de consolidation.

Après la phase de consolidation, et bien que les pressions interstitielles soient totalement dissipées, une déformation est cependant encore observée. C'est la phase de consolidation secondaire ou de fluage qui traduit un comportement visqueux du squelette dû à la nature des liaisons inter-particules. Le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser cette phase de fluage est le taux de compression secondaire  $C_{\alpha}$ . Sa détermination repose sur une évolution linéaire du tassement en fonction du logarithme du temps, ce qui, expérimentalement, est très généralement vérifié. Sa valeur est égale à celle de la pente de la droite, soit :

$$C_{\alpha} = \frac{1}{h_0} \cdot \frac{dh}{d(\lg(t))}$$

L'indice de fluage  $C_{\alpha\alpha}$ , qui tient compte de la variabilité de l'indice des vides initial des échantillons, est défini par :

$$C_{\alpha\alpha} = C_{\alpha} (1 + e_0)$$

Les déformations des matériaux argileux sont fortement irréversibles. Ceci se traduit par la notion de contrainte de préconsolidation,  $\sigma'_p$ , correspondant à la plus grande des contraintes qu'a subie préalablement le matériau. Si la sollicitation actuelle est inférieure à la contrainte de préconsolidation, la phase de consolidation sera peu développée, le matériau est alors dans un état dit surconsolidé. Le rapport entre la contrainte de préconsolidation et la contrainte actuelle, appelé degré de surconsolidation, permet de quantifier l'état de consolidation d'un matériau argileux. Il ne fait que traduire que la réponse à une sollicitation est fortement dépendante de l'arrangement actuel des particules, résultat de l'historique des sollicitations antérieures.

Le comportement visqueux du squelette influe aussi sur l'amplitude et la cinétique de la phase de consolidation. Le phénomène de surpressions interstitielles rend quasi-impossible la détermination directe de la loi de comportement d'un matériau argileux. Seule la détermination, par des essais spécifiques, des paramètres de relations empiriques ou issues de modélisations rhéologiques est possible. Beaucoup de relations ont été proposées ; elles peuvent se ramener à l'une des trois équations suivantes :

$$R(\sigma', \varepsilon) = 0 \quad \text{ou} \quad R(\sigma', \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = 0 \quad \text{ou} \quad R(\sigma', \dot{\sigma}', \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = 0$$

Les caractéristiques mécaniques dont l'évolution a été étudiée sont celles qui sont le plus classiquement utilisées. Elles sont issues de l'expérience et sont parfois approximatives. La loi de comportement du matériau est une relation linéaire entre l'indice des vides et le logarithme de la contrainte effective lorsque celle-ci est supérieure à la contrainte de préconsolidation. Elle est déterminée par l'ensemble des indices des vides obtenus après 24 heures de consolidation suivant un mode de chargement conventionnel. Ses deux principales caractéristiques sont :

- la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  ;
- l'indice de compression  $C_{\alpha}$ .

Les propriétés de fluage des matériaux argileux seront caractérisées par les valeurs de leur coefficient de compression secondaire  $C_{\alpha}$  ou celles de leur indice de fluage  $C_{\alpha\alpha}$ .

### 3. COMPORTEMENT DES MATERIAUX ARGILEUX SOUS SOLLICITATIONS THERMIQUES.

Suite à une augmentation de sa température, un matériaux argileux présente une modification de son volume total qui est conséquence de la sollicitation thermique sur les phases constituant le matériau : le fluide interstitiel et les particules sous forme d'un squelette. Les variations de volume respectives sont :

$$\begin{aligned} \text{- pour le fluide interstitiel} & : dV_w = \alpha_w V_w dT ; \\ \text{- pour les particules} & : dV_s = \alpha_s V_s dT ; \\ \text{- pour le squelette} & : dV_{\text{tot}} = \beta(T) V_{\text{tot}} dT. \end{aligned}$$

Si en conditions non drainées, il est évident que la variation de volume total est un gonflement du matériau, en conditions drainées, la quantité d'eau "expulsée" est égale à :

$$dV_w + dV_s - dV_{\text{tot}}$$

tandis que l'expression de la variation de volume total est :

$$dV_{\text{tot}} = \beta(T) V_{\text{tot}} dT.$$

Si les valeurs des coefficients de dilatation du fluide interstitiel et des particules sont plus ou moins facilement déterminables, il n'en est pas de même de celui du squelette,  $\beta(T)$ , qui est, à priori, fonction de la température, de l'arrangement initial des particules donc des caractéristiques mécaniques du matériau, mais dont aucune expression générale n'est connue. Même son signe est inconnu et il est donc impossible de prédire si, à long terme, une augmentation de la température d'un matériau argileux induira un tassement ou gonflement. De façon similaire, à la nouvelle température, les valeurs des caractéristiques mécaniques du matériau ne sont pas connues.

De nombreux auteurs ont effectué des essais de compressibilité et de fluage avec des sollicitations thermiques et/ou mécaniques afin de préciser le type de déformation induite par les sollicitations thermiques et l'influence de la température sur les caractéristiques mécaniques des matériaux argileux.

La viscosité du fluide interstitiel diminue avec la température selon une loi exponentielle, ce qui se traduit par une augmentation du coefficient de perméabilité des matériaux argileux et une réduction de la durée de la phase de consolidation. Suivant les matériaux étudiés, l'indice de compression augmenterait (FLEUREAU - 1979), diminuerait (DESPAX - 1976) ou serait peu influencé par la température (PLUM - 1969). Constatant que les écarts étaient du même ordre que ceux liés à la variabilité naturelle des caractéristiques des matériaux argileux, PHILIPPONNAT (1977) a ainsi proposé un nouvel essai de compressibilité accéléré par la température (70°C).

L'analyse d'essais de fluage effectués à une température supérieure à la température ambiante montre que les matériaux argileux auraient des propriétés de fluage plus importantes qu'à la température ambiante. Ceci se traduit par des valeurs plus grandes du taux de compression secondaire  $\dot{C}_\alpha$  (FLEUREAU - 1979, HURET - 1985).

De façon plus précise, un incrément de température provoque, généralement, un tassement différé dans le temps des matériaux argileux qui peut se décomposer en deux phases. (CAMPANELLA - 1968). Une phase primaire qui correspond à la dissipation de surpressions interstitielles générées par l'expansion thermique du fluide interstitiel qui est contrariée par une dilatation moindre du squelette et la faible perméabilité du matériau. Une phase secondaire qui correspond au comportement visqueux du squelette mais dont les caractéristiques seraient influencées par la température. L'amplitude du tassement à la fin de la phase primaire, ainsi que sa cinétique, est liée à l'amplitude des surpressions interstitielles générées par la sollicitation thermique qui est fonction de la propagation de la chaleur dans le matériau (HURET - 1985). Les sollicitations thermiques imposées ne peuvent donc pas être uniformes et instantanées et la comparaison des essais rapportés par les différents auteurs est très délicate.

Dans le cas d'un cycle chauffage-refroidissement, les déformations induites par la phase de chauffage seraient fortement irréversibles car cette dernière provoquerait une rigidification de la texture du matériau et il n'y aurait plus de réajustement des particules lors du refroidissement (CAMPANELLA - 1968, HURET - 1985).

Si aucune règle générale concernant l'évolution des caractéristiques d'un matériau argileux sous l'effet de sollicitations thermiques ne peut être dégagée de la bibliographie, il apparaît par contre que les paramètres prépondérants sont ceux caractérisant globalement les liaisons inter-particules et l'arrangement de ces particules, tels que l'indice des vides, le degré de surconsolidation, la compressibilité et la plasticité ainsi que la minéralogie.

#### 4. ETUDE EXPERIMENTALE

Pour étudier expérimentalement l'influence d'une sollicitation thermique sur les caractéristiques mécaniques, et en particulier le fluage, de matériaux argileux en fonction de leurs caractéristiques minéralogiques et géotechniques, huit matériaux ont été échantillonnés et caractérisés. Tous ces matériaux ont été prélevés en subsurface soit dans des carrières en exploitation, soit à l'occasion de sondages de reconnaissance géotechnique. Trois matériaux ont été sélectionnés de telle sorte qu'ils présentent des caractéristiques bien marquées et différentes d'un matériau à l'autre (tab. 1). Leur texture a aussi été caractérisée par des observations en microscopie électronique et des essais de porosimétrie au mercure.

Matériau	Minéralogie	Plasticité	d° consolidation
St Genest	K	Plastique	Surconsolidé
Limay	K - I - IS	Très plastique	Surconsolidé
Lagny	I - S	Silteuse	Normal <sup>c</sup> . consol.

K : kaolinite

S : smectite

I : illite

IS : interstratifiés illite-smectite

Tab. 1 - Principales caractéristiques des trois matériaux argileux sélectionnés.

Tab. 1 - Main characteristics of selected clayey materials.

L'essai de base utilisé pour cette étude a été l'essai de compressibilité et de fluage en cellule oedométrique à contre-pression. La contre-pression, dont la valeur a été fixée à 300 kPa, est nécessaire pour atteindre une température de 110°C sans phénomène d'ébullition. Une cellule oedométrique spécifique a été conçue au Centre de Géologie de

l'Ingénieur afin d'obtenir une mesure de déformation des éprouvettes sous l'effet de sollicitations thermiques qui soit sensible et fiable. Les spécificités de cette cellule sont :

- l'utilisation de l'INVAR pour la réalisation de la bague de sertissage et des pièces intervenant dans la mesure de la déformation ;
- l'utilisation d'une membrane roulante pour assurer l'étanchéité au niveau du piston de chargement tout en minimisant les frottements ;
- l'utilisation de capteurs de déplacement de haute qualité (précision de 2 µm).

La cellule est immergée dans un bain thermostaté qui permet de générer les sollicitations thermiques. Le temps de montée en température au coeur de l'échantillon est d'environ 3 mn/°C.

Pour chaque matériau, deux contraintes de référence ont été définies : la première est la contrainte d'anti-gonflement et la seconde correspondant au majorant de la contrainte de préconsolidation tel que défini par la méthode de CASAGRANDE. Pour chaque éprouvette, leurs valeurs ont été déterminées en fonction de leur teneur en eau initiale. La première contrainte sera celle imposée lors de la phase de saturation préliminaire à tout essai, la seconde est celle qui sera imposée et maintenue constante pendant les essais avec sollicitations thermiques. Cette contrainte a été choisie car c'est pour cette valeur de contrainte effective que l'arrangement des particules présente une sensibilité maximale aux sollicitations extérieures.

Quatre températures, 20, 50, 80 et 110°C, ont été choisies pour définir les sollicitations thermiques suivantes :

- a) montée en température directe à 20, 50, 80 et 110°C avec étude du fluage, sur trois mois environ, étude à moyen terme ;
- b) montée en température directe à 80°C avec étude du fluage, sur neuf mois environ, étude à long terme ;
- c) montée en température progressive de 20° à 110°C par paliers de 30°C, la durée de chaque palier étant de deux mois environ ;
- d) montée en température progressive puis descente progressive entre 20° et 50°C, entre 20° et 80°C et entre 20° et 110°C avec des paliers de 30°C, la durée de chaque palier étant de deux mois environ.

Les essais de montée en température directe ont été réalisés en imposant la sollicitation mécanique soit avant, soit après la sollicitation thermique. Des essais de compressibilité à 20, 50 et 110°C ont aussi été réalisés.

L'évolution de l'arrangement des particules avec la température a été caractérisée soit indirectement en cours d'essai par la mesure, sous charge constante, de la perméabilité des échantillons, soit après essai par des essais de porosimétrie au mercure et des observations au microscope électronique.

## 5. SYNTHESE DES RESULTATS

Des incidents expérimentaux et une grande variabilité des teneurs en eau initiales ne permettent pas de procéder ici à une analyse complète des résultats obtenus pour chacun des matériaux argileux étudiés. Seule une synthèse globale sur le comportement mécanique des matériaux argileux et leur évolution en fonction de la température sera présentée.

### 5.1. ESSAIS DE COMPRESSIBILITE

Pour un même matériau et un même palier de charge de même durée, l'examen des courbes de consolidation à deux températures différentes montre que plus la température est élevée, plus la durée de la phase de consolidation primaire est courte ; cette réduction est parfaitement expliquée par celle de la viscosité du fluide interstitiel. Par rapport à un essai à température ambiante, ce phénomène implique que lorsque les pressions interstitielles sont dissipées le tassement observé peut être différent et qu'à la fin du palier de charge une plus grande part du tassement final est due au phénomène de fluage. Donc la courbe de compressibilité, déterminée à partir des tassements observés après 24 h de consolidation, est encore plus approximative que celle déterminée à la température ambiante pour caractériser la compressibilité d'un matériau argileux. Les faibles variations du coefficient de compression  $C_c$  (10 à 15 % entre 20 et 110°C) ne sont donc pas représentatives de l'évolution de la compressibilité des matériaux argileux étudiés.

### 5.2. ESSAIS DE FLUAGE

Ces essais, d'une durée d'au moins quatre semaines, effectués aux différentes températures ont été réalisés avec une contrainte légèrement supérieure à la contrainte de préconsolidation. Une fois la phase de consolidation primaire terminée, la déformation présente une évolution linéaire en fonction du logarithme du temps et ce quelles que soient la température et la durée d'observation (jusqu'à 9 mois). Les valeurs des coefficients  $C_\alpha$  ou  $C_{\alpha\alpha}$  augmentent avec la température (fig. 1a). Reportés dans un diagramme  $\lg(C_{\alpha\alpha}) - 1/T(K^{-1})$  les points correspondants sont globalement alignés, ce qui peut se traduire par une évolution de l'indice de fluage avec la température suivant la loi d'ARRHENIUS (fig. 1b).

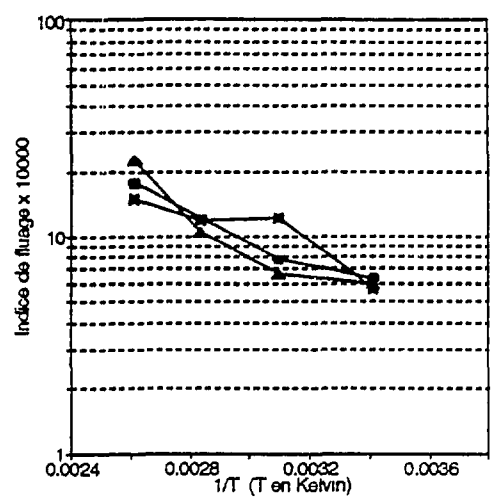
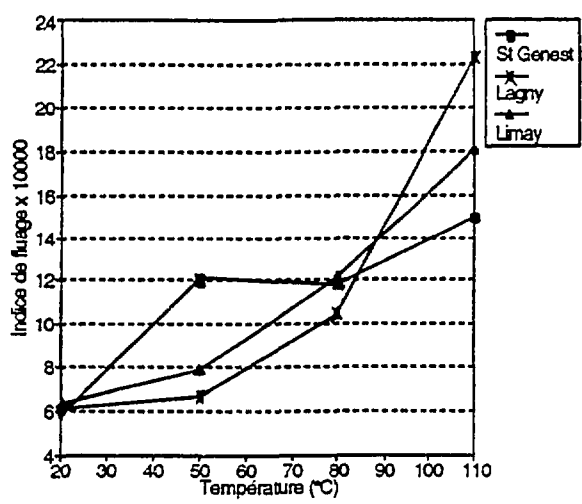


Fig. 1 - Evolution de l'indice de fluage avec la température.

Fig. 1 - Creep index versus temperature.

### 5.3 ESSAIS A CONTRAINTE CONSTANTE ET TEMPERATURE VARIABLE.

Ces essais ont pour but d'étudier l'influence d'une sollicitation thermique sur la déformation par fluage d'un matériau argileux. Ils mettent en évidence le mode d'action d'une telle sollicitation sur le matériau.

Suite à une augmentation de température, l'évolution de la déformation en fonction du logarithme du temps peut se décomposer en trois phases. La première phase est caractérisée par un gonflement qui est dû à une dilatation du fluide interstitiel qui n'est pas totalement compensée par le drainage de l'échantillon. Tout comme dans le cas d'une sollicitation mécanique, il en résulte des pressions interstitielles qui vont se dissiper lors la deuxième phase de déformation qui est identique à une phase de consolidation primaire. La dernière phase est une phase de fluage établi avec une évolution linéaire du tassement en fonction du logarithme du temps. L'évolution du coefficient de compression secondaire, avec la température, est croissante et spécifique à chaque matériau. Elle est différente de celle observée lors des essais de fluage.

Les tassements observés en fin de deuxième phase sont le résultat d'un processus de dissipation de pressions interstitielles générées par la sollicitation thermique, similaire au phénomène de consolidation. Pendant cette phase, il y a une variation continue de la pression interstitielle donc de la contrainte effective. Si leurs valeurs finales sont connues, les valeurs initiales de ces deux grandeurs sont inconnues car, elles sont fonction de la propagation de la chaleur dans l'éprouvette, de la perméabilité du matériau et de la déformabilité du squelette. En fait la sollicitation thermique, en induisant une expansion du fluide interstitiel, impose un déplacement relatif des particules qui se trouvent alors hors équilibre. Par réaction, cet état de non équilibre génère des surpressions interstitielles dont la dissipation conduit à un réarrangement des particules sous l'action des contraintes effectives qui sont alors croissantes. L'état d'équilibre final est généralement plus compact. Il est fonction, d'une part de ce phénomène de déconsolidation consécutif à l'augmentation de température et qui est dû à l'expansion du fluide interstitiel et d'autre part de la modification de l'intensité des liaisons inter-particules liée à l'augmentation de la température. L'importance relative du premier phénomène permet d'expliquer qu'on observe in fine soit un tassement, soit un gonflement quand le matériau est très surconsolidé (degré de surconsolidation supérieur à 2,5 ; BALDI et al. - 1987, BOUCLY-NOROTTE - 1991).

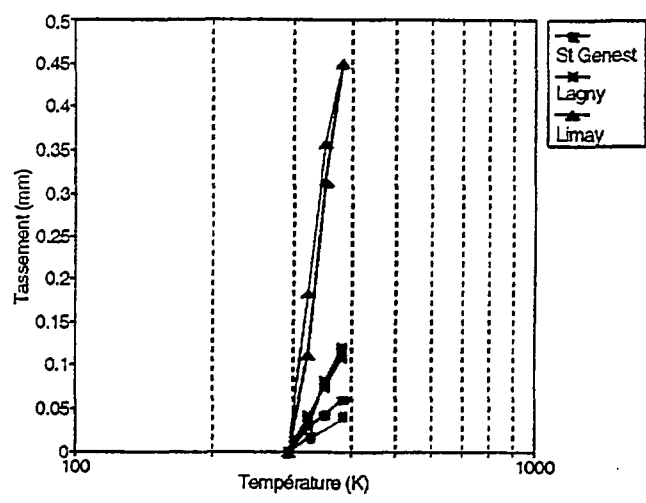


Fig. 2 - Tassements à l'issue des phases de consolidation générées par les sollicitations thermiques.

Fig. 2 - Settlements after consolidation due to thermal solicitations.

Tous les essais ayant été effectués avec une puissance de chauffe constante, il est possible de comparer les valeurs des tassements observés qui sont directement liées à celles des températures imposées. En reportant ces valeurs dans un diagramme tassement- logarithme de la température absolue, les points correspondants s'alignent le long de droites, chacune étant caractéristique d'un matériau (fig. 2). La relation obtenue est similaire à celle caractérisant la compressibilité des matériaux. Il est donc possible d'assimiler un incrément de température à un incrément de contrainte. La valeur de la contrainte équivalente peut se déterminer en procédant à un simple changement d'axes.

Pour une température donnée, il n'y a pas de différence entre les points obtenus par montée directe ou par paliers, sauf pour le matériau le plus compressible.

Lors d'un refroidissement consécutif à un chauffage, les déformations observées sont très faibles ou quasi-nulles. Donc les déformations induites par le chauffage sont fortement irréversibles. Pour le matériau le plus plastique, la déformation observée est un gonflement différé dans le temps qui comme lors du chauffage peut se décomposer en trois phases : un tassement suite à la sollicitation thermique négative, une phase primaire et une phase de fluage établi. Ce comportement symétrique de celui observé lors du chauffage est similaire à celui que présentent les matériaux argileux suite à un déchargement. Les valeurs absolues des déformations en fin de phase primaire et du coefficient de gonflement secondaire sont au moins dix fois plus faibles que celles obtenues lors du chauffage.

#### 5.4. PERMEABILITE - TEXTURE

Les mesures de perméabilité en cours d'essai avec sollicitations thermiques traduisent l'évolution du coefficient de perméabilité avec la température. Cette évolution est liée à celles de la texture du matériau considéré et des caractéristiques du fluide interstitiel. Pour obtenir une grandeur caractéristique de l'évolution de la texture du matériau, les valeurs obtenues ont été corrigées afin d'éliminer les variations de viscosité et de masse volumique du fluide de mesure avec la température. Les valeurs corrigées sont quasi-constantes (fig. 3). Donc la texture du matériau est très peu modifiée, du moins au niveau de sa macroporosité (accès de pores  $> 1 \mu\text{m}$ ) puisque c'est celle-ci qui conditionne la perméabilité d'un matériau. Ceci signifie aussi que les variations du coefficient de perméabilité observées sont uniquement dues aux variations des caractéristiques du fluide interstitiel avec la température.

Les observations en microscopie électronique qui apportent aussi des informations sur la macroporosité n'ont pu être réalisées car lors du démontage des cellules pour récupérer les échantillons, ils ont été affectés par un gonflement lié au déchargement et dont l'amplitude était d'autant plus importante que la température était élevée. Or ce gonflement perturbe essentiellement la texture au niveau de la macroporosité.

Les essais de porosimétrie au mercure donnent des informations sur les évolutions texturales à l'échelle de la microporosité (rayon d'accès de pores compris entre  $0,1$  et  $1 \mu\text{m}$ ) et de l'ultraporosité (rayon d'accès de pores inférieur à  $0,1 \mu\text{m}$ ). Avant essai, des porosimétries au mercure avaient été réalisées. Chaque matériau se caractérise par la part de chacun des trois types de porosité dans son volume poreux injecté et par les rayons d'accès de pores les plus fréquents. Pour les trois matériaux étudiés, l'ultraporosité représente entre 40 et 70 % du volume poreux injecté et il existe un rayon d'accès caractéristique situé dans la microporosité.

Après sollicitation thermique, on observe une disparition de ce rayon d'accès caractéristique au profit d'un nouveau rayon caractéristique situé dans l'ultraporosité. De même la part relative de l'ultraporosité augmente avec la température, au détriment de celle de la microporosité. Ces variations de texture sont différentes de celles induites par une sollicitation mécanique, inférieure à 2 MPa, qui provoque une réduction de la macroporosité et d'une partie de la

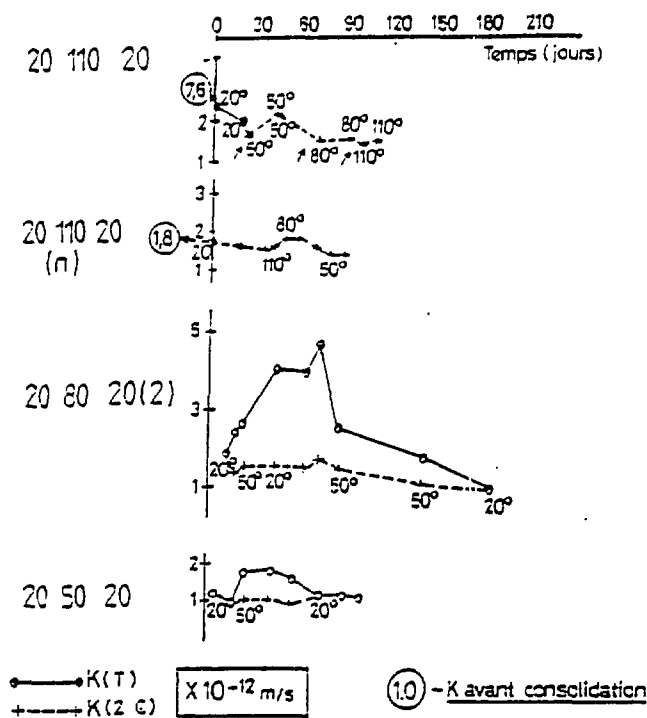


Fig. 3 - Perméabilité en fonction de la température et du temps (argile de Limay).

Fig. 3 - Permeability versus temperature and time (clay of Limay).