Influence des fluides sur le comportement différé de la craie

G. Priol, Vincenzo de Gennaro, Pierre Delage, Claudia Sorgi, J. Vicente, C. Hernandis

▶ **To cite this version:**

G. Priol, Vincenzo de Gennaro, Pierre Delage, Claudia Sorgi, J. Vicente, et al.. Influence des fluides sur le comportement différé de la craie. 22. Rencontres universitaires de génie civil, Jun 2004, Marne-La-Vallée, France. pp.NC. ineris-00976151

HAL Id: ineris-00976151
https://ineris.hal.science/ineris-00976151

Submitted on 9 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INFLUENCE DES FLUIDES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DE LA CRAIE

Grégoire Priol [1], Vincenzo De Gennaro [1], Pierre Delage [1], Claudia Sorgi [2], José Vicente Candel Hernandis[1]

[1] CERMES. – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC-LCPC, Institut Navier) – Cité Descartes – 6-8 avenue Blaise Pascal – Champs/Marne - 77 454 Marne-la-Vallée Cedex 2
[2]INERIS – Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques – Parc Technologique Alata – BP 2 – 60 550 Verneuil en Halatte

RESUME. Une étude expérimentale préliminaire a été menée au CERMES au moyen d'essais oedométriques par paliers pour mettre en évidence le rôle joué par les fluides lors de la compaction des craies. Fondée sur une recherche précédente, l'analyse de la subsidence des réservoirs pétroliers en Mer du Nord, l'adaptation de l'essai oedométrique aux craies multiphasiques (air/eau ou huile/eau) a nécessité des précautions particulières. La procédure a été validée avec succès par les premiers résultats qui mettent en évidence un effet du fluide saturant sur le fluage unidimensionnel du matériau. En effet, le fluide selon sa mouillabilité diminue la résistance du matériau et amorce un comportement visqueux précoce. Dépendant du rapport entre la contrainte appliquée et la limite élastique, le fluage est plus important quand l'échantillon est saturé du fait de la diminution de la limite élastique qui en suit. La prise en compte de ces aspects du comportement mécanique des craies s'avère indispensable dans l'analyse de la stabilité à long terme d'anciennes carrières souterraines.

MOTS-CLÉS : essai oedométrique, craie multiphasique, fluage.

ABSTRACT. A preliminary experimental study was performed by means of loading stages oedometric tests to highlight the role played by the fluids in the compaction of chalks. Based on a preceding research, the analysis of the North Sea oil reservoir subsidence, the oedometer adaptation to multiphase chalks (air/water or oil/water) required particular precautions. The procedure was validated successfully by the first results which highlight an effect of the fluid saturating on one-dimensional creep. The fluid according to its wettability decreases the resistance and the viscous behaviour starts earlier. Depending on the relationship between the applied stress and the pre consolidation stress, creep is more important when the sample is saturated due to the decrease of the pre consolidation stress. These aspects of the mechanical behaviour of chalks should then be taken into account in an analysis of the long-term stability of underground quarry.

KEYWORDS: odometer, multiphase chalk, creep.

1. INTRODUCTION

La connaissance et la caractérisation du comportement mécanique des craies constitue depuis quelques décennies un sujet d'intérêt majeur, en Europe (France, Belgique, Norvège, Angleterre) mais également dans d'autres pays extra-européens (Israël). On cite, à ce titre, parmi d'autres, les travaux récents de Lord *et al.* (2002) et Talesnick *et al.* (2001). Des raisons multiples sont associées à cet intérêt croissant : les enjeux économiques liés aux phénomènes de subsidence durant l'exploitation par injection d'eau des gisements en Mer du Nord ; mais aussi la nécessité de mieux comprendre les mécanismes de vieillissement qui sont à l'origine des instabilités des massifs rocheux lorsque ceux-ci subissent des variations naturelles d'hygrométrie et de température (cas des carrières, ou des versants naturels). Il a été observé pour des calcaires de carrières souterraines que les conditions hygrométriques sont variables et les piliers présentaient des variations importantes de degré de saturation S_{rw} entre 60% et 100% (Morat *et al.*, 1992 ; Durville *et al.*, 1993). Or, la craie est un

matériau sensible à l'eau, notamment du fait de l'existence de nombreuses interactions physico-chimiques (précipitation/dissolution, adsorption, complexation …) ce qui se caractérise par une rupture de la craie est plus fragile lorsque saturée en eau (Dessenne, 1971 ; Hazebrouck & Duthoit 1979). Il a été d'ailleurs montré que la saturation de la craie provoque une perte importante de résistance à la compression (Masson, 1973 ; Bonvallet, 1979 ; De Gennaro *et al.* 2003).

Des travaux, menés au CERMES dans le cadre du projet européen PASACHALK, ont montré que le comportement différé de la craie soumise au pétrole et à l'injection d'eau est fortement variable et pouvait expliquer la subsidence des plates-formes pétrolières (Delage *et al.*, 1996 ; De Gennaro *et al.*, 2003). Ce projet, fondé sur l'application des concepts de la mécanique des sols non saturés, a permis le développement d'appareillages d'études du comportement différé de la craie sous contrôle de la succion. La succion s_0, différence de pressions entre le fluide non-mouillant (l'air ou l'huile) et le fluide mouillant (l'eau), est la variable de contrainte associée aux changements de degré de saturation en eau. La relation S_{rw} s_0 est définie par la courbe de rétention d'eau de la craie. Cette approche a été conservée et appliquée à la craie d'Estreux, provenant d'une carrière souterraine du nord de la France, afin de caractériser son comportement hydro-mécanique. La craie de la carrière d'Estreux est un matériau multiphasique, où la fraction solide interagit avec l'air et l'eau. Pour la caractérisation du comportement mécanique et l'étude des phénomènes de vieillissement, deux aspects complémentaires sont abordés : l'étude des propriétés de rétention d'eau dans la craie, et le couplage hydro-mécanique intégrant les effets du temps (fluage).

2. LES CRAIES ETUDIEES

En nature, ils existent différents types de craies dont les propriétés dépendent fortement de leur mode de déposition, leur âge, l'histoire géologique vécue (Lord *et al.*, 2002 ; Clayton, 1983 ; Doremus & Henry, 1985 ; Masson, 1973). La Figure 1 illustre de manière symbolique : la craie multiphasique, composée en son sein d'eau (provenant du balayage du réservoir à l'eau) et de pétrole, et la craie des carrières avec l'air et l'eau.

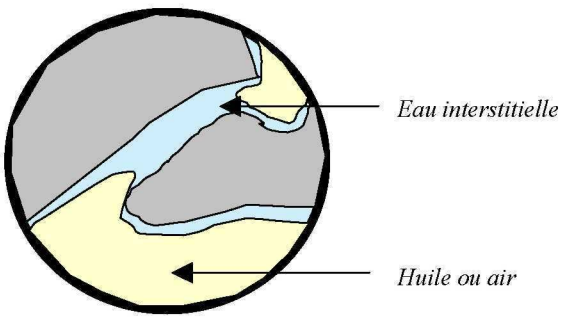

Figure 1 Représentation schématique du milieu poreux

Les horizons de craie sont la conséquence de la déposition d'algues planctoniques unicellulaires : les coccolithophoridés. Ces algues sont souvent désagrégées en grains, cristaux de calcite (2,72 g/cm^3). Dès lors, les craies sont classées parmi les roches sédimentaires dans les biomicrites friables, essentiellement formée de carbonate de calcium $CaCO_3$, à l'état de calcite, en proportion variable jusqu'à 90 – 95 %. Deux craies différentes ont été analysées : la craie de Lixhe, extraite d'une carrière

près de Liège, et une craie glauconieuse (la glauconie est un silicate hydraté de fer et de potassium) provenant de la carrière d'Estreux. La première est pure et blanche, contenant environ 99% de calcite avec une porosité variant entre 40 à 43 % et son poids atteint 19,7 kN/m^3. Cette craie a été sélectionnée pour ces similarités avec la craie de réservoir en Mer du Nord. La seconde, de porosité légèrement inférieure à celle de Lixhe (35%), montre une dispersion plus importante de la taille des pores, vérifié à l'aide d'essai au porosimètre, et un rayon moyen d'accès des pores de 800 nm (400 nm pour Lixhe).

3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

3.1. DETERMINATION DE LA COURBE DE RETENTION PAR LA METHODE OSMOTIQUE

La méthode osmotique (De Gennaro *et al.* 2003) a été utilisée afin de déterminer la courbe de rétention (ou courbe capillaire) des craies et de préparer les échantillons avant les essais oedométriques. Elle consiste à placer un échantillon cylindrique saturé en huile ou sec dans une membrane et à plonger l'ensemble dans une solution homogénéisée de polyéthylène glycol (PEG) à concentration donnée (Figure 2). Le PEG est constitué de longues chaînes de radicaux éthyle C_2H_4. Au contraire de l'eau, les molécules de PEG ne peuvent pas traverser la membrane semi-perméable à cause de leur grande taille. Ainsi, un échantillon, mis en contact avec la solution aqueuse par l'intermédiaire de la membrane semi-perméable, est soumis à une succion osmotique qui est autant plus forte que la concentration en PEG est élevée. Des études montrent que la relation entre concentration de la solution et succion ne dépend pas de la masse molaire ; pour succions les inférieures à 6,25 MPa la relation succion concentration est (Delage *et al.* 1996): $s = 11\,c^2$

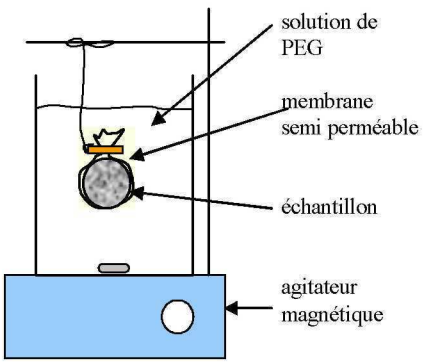

Figure 2 : Mise en œuvre de la technique osmotique

3.2. L'ESSAI OEDOMETRIQUE

Le principe fondamental de l'essai oedométrique est de charger une éprouvette de sol contenue latéralement par une paroi lisse indéformable. Les déformations radiales sont considérées comme négligeables. Contrairement aux sols, généralement reconstitués directement dans la cellule par compaction (Magnan *et al.*, 1985), les échantillons oedométriques cylindriques de craie (50 millimètres environ de diamètre D et avec une hauteur H telle que le rapport H/D=2,5) sont obtenus à l'aide d'un tour mécanique. Le tour est choisi pour obtenir une bonne adéquation entre la cellule et l'échantillon et minimiser le remaniement. La saturation en eau ou en huile est une étape préliminaire : d'abord, les spécimens sont séchés à 105°C pour éliminer toute l'eau libre (Lord *et al.*, 1998), puis

saturés sous vide par le fluide choisi. Compte tenu de l'importance des charges à appliquer sur le matériau, nous avons utilisé un bâti oedométrique à bras de levier (multiplicateur x 50) spécialement dessiné pour l'étude des argiles fortement consolidées (Marcial 2003). Les échantillons, destinés aux essais à succion contrôlée, sont préalablement stabilisés par la méthode osmotique (§3.1).

Afin de contrôler la succion (et la teneur en eau), nous avons utilisé la méthode osmotique (voir §3.1) adapté à l'essai oedométrique classique. L'embase inférieure de l'oedomètre permet une circulation d'une solution de P.E.G. au-dessous d'une membrane semi-perméable par l'intermédiaire d'une pompe péristatique. L'ensemble est maintenu à température constante (20°C) par un bain thermostaté, la cellule étant rendue étanche par une membrane néoprène. Enfin, le montage est complété par un système de mesure des déplacements verticaux. L'application du principe de l'oedomètre à succion contrôlée par la méthode osmotique à l'étude des effets du temps nécessite plusieurs précautions. La première concerne la durée de l'essai. En effet, la membrane semi-perméable est fragile vis-à-vis des bactéries et de leurs développements, et vis-à-vis des efforts mécaniques. Pour éviter le bouchage des pores, de la pénicilline est introduite pour prévenir la prolifération des bactéries. La seconde précaution à prendre concerne la condition de drainage de l'essai. En effet, le drainage de l'eau de l'échantillon et le contrôle de la teneur en eau par osmose sont antagonistes. Ces changements sont surveillés au moyen d'un tube millimétré. Par conséquent, la vitesse de la pompe péristatique, qui assure le renouvellement permanent de la solution en contact avec la membrane, doit être ajustées pour conserver la condition de succion constante.

4. COURBES DE RETENTION D'EAU

La stabilisation osmotique des échantillons de craie peut durer plusieurs semaines (Figure 3), et la teneur en eau, calculée par la méthode de pesée, atteint un équilibre plus ou moins rapidement selon le niveau de succion imposé. A chaque niveau de succion correspond une teneur en eau, ces points (Figures 4 et 5) constitue ainsi la courbe de rétention où est reporté en abscisses la teneur en eau en fonction du logarithme de la succion.

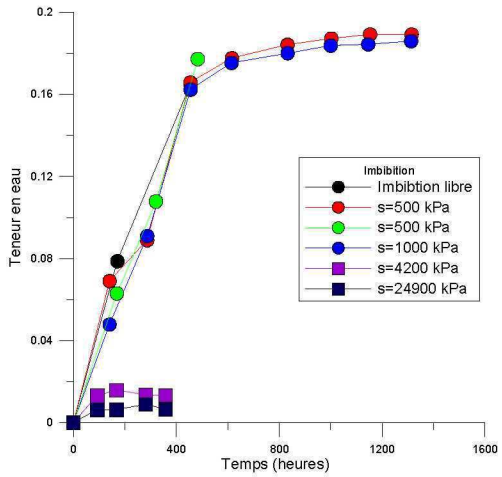

Figure 3 Evolution temporelle de la teneur en eau en fonction de la succion (craie d'Estreux)

Les courbes de rétention (Figures 4 et 5) permettent de mettre en évidence les niveaux de succion nécessaires à l'introduction d'air dans le milieu poreux (pression d'entrée d'air) respectivement 250 kPa pour la craie de Lixhe et 1500 kPa pour celle d'Estreux. D'autre part, la désorption complète n'est

pas possible, une teneur en eau résiduelle (0.3%) est observée même à des succions élevées (25000 kPa). Même soumise à une atmosphère très sèche, la craie conserve en son sein de l'eau ; par contre, l'imbibition libre, succion nulle, permet une saturation complète de l'échantillon pour les deux craies (w_{sat}=21% craie d'Estreux, w_{sat}=27% craie de Lixhe). La différence de porosité entre les deux craies, 35% contre 42% en moyenne, perturbent la comparaison ; mais il est intéressant de remarquer la différence entre les deux courbes au niveau de l'hystérésis (écart entre la courbe de drainage et celle d'imbibition). En effet, il semble que la craie d'Estreux dispose d'un hystérésis plus important, peut-être causé par une adsorption plus importante de l'eau par la glauconie que par la calcite.

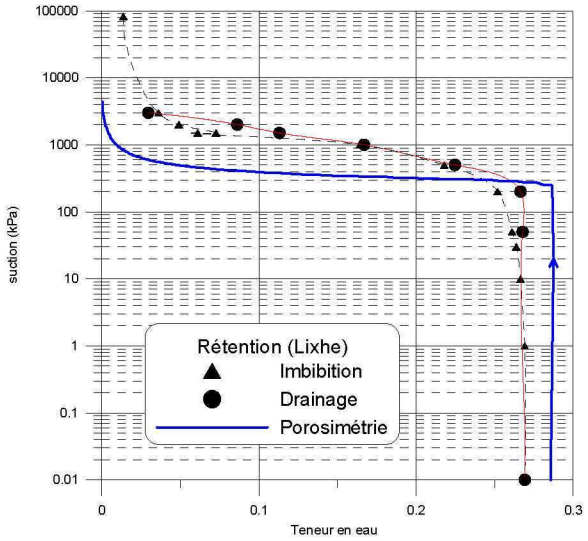

Figure 4 Courbe de rétention de la craie de Lixhe pour le couple air eau

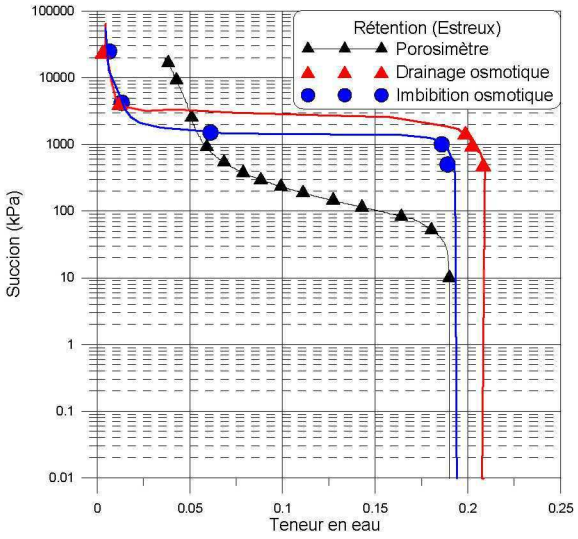

Figure 5 Courbe de rétention de la craie d'Estreux pour le couple air eau

L'analyse des courbes d'injection du mercure obtenues au porosimètre permet d'obtenir des courbes de rétention. En effet, nous pouvons assimiler l'intrusion de mercure (fluide non –mouillant) au drainage de la vapeur de mercure (fluide mouillant), ainsi l'injection de mercure avec un angle de contact moyen de 146° est équivalent à l'injection d'air dans les pores avec une tension capillaire à l'interface air-eau de 72.10^{-3} N/m. A partir de la loi de Laplace Jurin, nous pouvons relier les courbes de rétention des couples mercure-vapeur de mercure, et air-eau :

$$s_0 = P_{air} - P_{eau} = Pc_{mercure-vapeur} \frac{\sigma_{air-eau} \cos\theta_{air-eau}}{\sigma_{mercure-vapeur} \cos\theta_{mercure-vapeur}} \qquad \text{[Eq. 1]}$$

Avec $\theta_{air\text{-}eau}$=0° (Delage *et al.* 1995) car totalement non mouillant.

La courbe déduite du porosimètre, purement capillaire, (Figures 4 et 5) est largement distante de la courbe réelle obtenue par la méthode osmotique, ceci est valable pour les deux craies et plus marqué pour la craie d'Estreux. Par conséquent, la rétention de la craie n'est donc pas uniquement d'origine capillaire ; ils existent des mécanismes physico-chimiques qui interviennent et modifient l'absorption de l'eau par la craie. Ces mécanismes semblent plus importants dans le cas de la craie d'Estreux, les deux aspects observés (hystérésis et rétention capillaire) pourraient être associés à la présence de glauconie.

5. COMPORTEMENT MECANIQUE

5.1. *LES RELATIONS EFFORTS DEFORMATIONS*

Les Figures 6 et 7 présentent les résultats des essais oedométriques, en reliant la contrainte axiale appliquée à la déformation totale observée pour chaque palier. L'influence de la succion et du fluide sur la limite élastique σ_0 est mise en évidence pour les deux craies. En effet, la limite élastique diminue selon le degré de mouillabilité du fluide, l'eau étant le fluide le plus mouillant et l'air le moins. Le comportement mécanique du matériau est fortement modifié par le fluide, notamment l'eau, et la transition entre un comportement 'à l'eau' et un comportement 'à l'huile', nous retrouvons ici un comportement bien établi avec l'essai triaxial (De Gennaro *et al.*, 2003, Priol *et al.*, 2004).

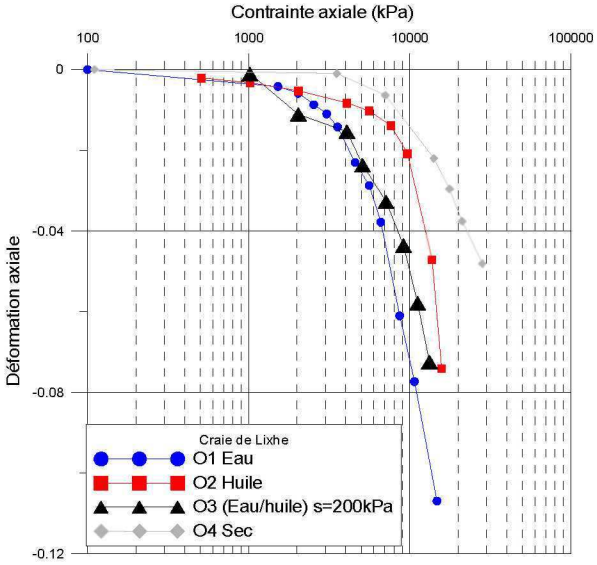

Figure 6.: Courbe efforts déformations sur la craie de Lixhe

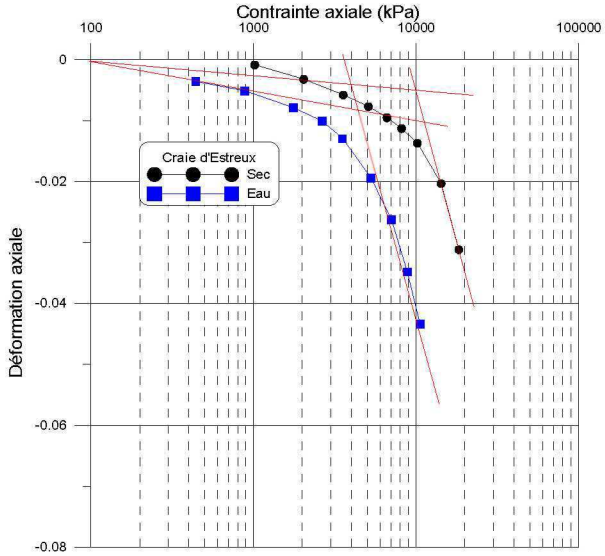

Figure 7 : Courbe efforts déformations sur la craie d'Estreux

Il est néanmoins intéressant de noter que le comportement de la craie d'Estreux suit le même schéma que celui établi pour la craie pétrolifère, étant attendu que le comportement 'sec' et 'saturé' encadre le niveau intermédiaire en teneur en eau. Des essais à teneur en eau variable sont donc la prochaine étape de validation de cette approche. Enfin, notons toutefois que, compte tenu de la grande variabilité de la craie et du faible nombre d'essais, aucunes conclusions ne peuvent être apportées quant à l'influence des fluides sur les pentes pseudo-élastique et plastique.

5.2. *LE FLUAGE*

Le fluage se définit par les déformations différées sous chargement constant correspondant en compression oedométrique à la phase de consolidation secondaire où la surpression interstitielle est nulle. Classiquement, la théorie de la consolidation de Terzaghi est utilisée pour l'analyse des courbes obtenues et déterminer la fin de la consolidation primaire, phase de dissipation de la surpression interstitielle générée par le chargement. Pour cela, deux méthodes sont habituellement mises en place ; cependant, aucune ne permet pour la craie de définir un point représentatif (effort déformation) pour chaque palier considéré. La méthode de Casagrande, utilisée par Lord (2002) pour des paliers de quelques jours, n'aboutit à aucun changement de concavité qui marque la fin de la consolidation

primaire et ce malgré des paliers de plus de 100 jours effectués sur la craie de Lixhe. C'est pourquoi, le tassement final (la durée varie entre 48h en phase pseudo-élastique à 7 jours, voire plusieurs mois, en phase plastique) est reporté en fonction de la contrainte appliquée. En effet, nous estimons que la compressibilité et la perméabilité du matériau sont suffisantes pour ne pas créer de surpressions significatives. De plus, la théorie de la consolidation est fondée sur un certain nombre d'hypothèse qui limitent sa validité notamment la surpression (Δu) est supposée égale à l'incrément de contrainte ($\Delta\sigma$). Cette dernière hypothèse semble particulièrement inappropriée dans le cas de la craie, avec notamment un indice de Skempton pour la craie de Lixhe de 0,8 (Gourri, 1991). Un nouveau modèle de consolidation est en cours d'élaboration actuellement pou pallier cette carence.

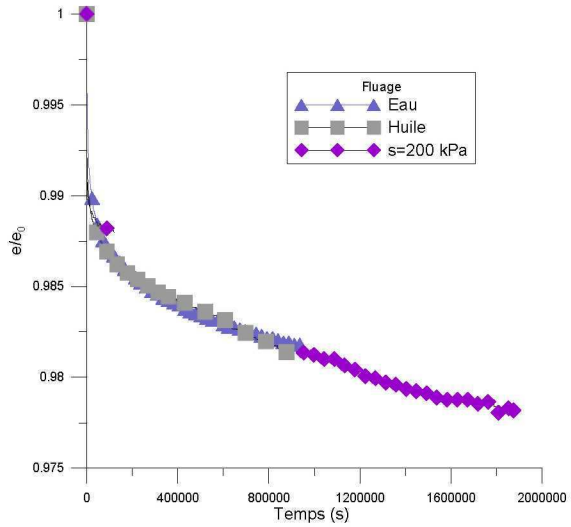

Figure 8 Fluage pour différentes configurations hydriques (Lixhe)

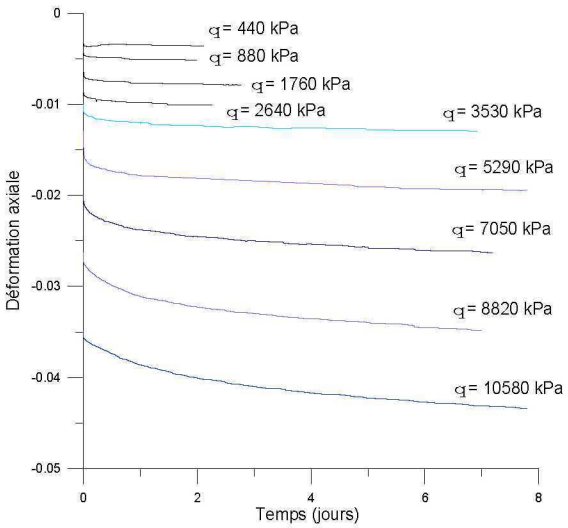

Figure 9 Paliers de chargement (Estreux)

La Figure 9 présentent les tassements en fonction du temps à divers niveaux de contraintes pour la craie d'Estreux. En phase plastique, les courbes s'arrondissent de plus en plus, montrant une diffusion grandissante des déformations. Néanmoins, afin d'évaluer l'influence des fluides sur ces courbes, il est nécessaire de tenir compte de l'état de surchragement de la craie. En effet, comme la limite élastique varie selon le fluide ; à même chargement, l'échantillon n'est autant plastique. C'est pourqoui, nous avons tracé les courbes obtenues (Figure 8) au même rapport : contrainte sur la limite élastique $\frac{\sigma}{\sigma_0}$. Les comparaisons, comme illustrées par la Figure 8 établie pour $\frac{\sigma}{\sigma_0}$ égal à 1,1, montrent que le fluide ne modifie pas le fluage. Le fluage ne dépend donc que du ratio de la contrainte sur la contrainte de pré consolidation. Par conséquent, la quantité de fluage augmentera lors du passage d'un matériau sec à saturé en eau du fait de la diminution de la limite élastique.

6. CONCLUSION

Il a été établi dans cet article, par le biais d'essais oedométriques, que les fluides saturant la craie disposaient d'effets importants sur son comportement mécanique et notamment sur le fluage. Le fluage ne semble être la conséquence que de la distance à la limite élastique. Cette limite dépendant de la configuration hydrique, les tassements engendrés par une modification hydrique sont eux aussi

différés. Il est donc important de prendre en compte ce retard dans les problèmes de tassement de massifs crayeux dus aux modifications hydriques du matériau : humidification des piliers, ou injection d'eau dans les réservoirs pétroliers.

7. BIBLIOGRAPHIE

Bonvallet J. (1979) « Une classification géotechnique des craies du nord utilisée pour l'étude de stabilité des carrières souterraines», *Revue Française de Géotechnique*, vol 8, p. 5-15.

Clayton C.R.I. (1983) « The influence of diagenesis on some index properties of chalk in engineering » *Géotechnique*, n°33, p. 225-241.

De Gennaro V., Delage P., Cui Y.-J., Schroeder C., Collin F. (2003) «Time-dependent behaviour of reservoir chalk: a multiphase approach », *Soils and foundations*, vol. 43, p. 131-147 .

Delage P., Cui Y-J., Audiguier M. & Deveughele M. (1995) « Water retention properties and microstructure of geomaterials », ECSMFE XI.

Delage P., Schroeder C., Cui Y.-J., (1996) « Subsidence and capillary effects in chalk », *Proc. Eurock 96 Turin,* p. 1291-1298.

Dessene J.-L. (1971) « Etude rhéologique et géotechnique de la craie », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble.

Doremus C., Henry J.P. (1985) « Caractérisation des craies du Nord de la France par porosimétrie au mercure », *Ann. Soc. Géol. Nord.* CIV49-51.

Durville J.-L., Massieu E. & Martineau F. (1993) « Etude physico-mécanique du gypse d'une carrière souterraine en région parisienne», *Geotechnical Eng. of hard soils-Soft Rocks*.

Gourri A. (1991) « Contribution à l'étude de l'influence des conditions de drainage sur les propriétés poroélastiques des roches carbonatées » thèse de doctorat, Université J. Fourier Grenoble.

Hazebrouck R. & Duthoit B. (1979) « Particularités du comportement mécanique des craies : rôle de l'eau- rupture sous contrainte hydrostatique», *Revue Française de Géotechnique*, vol 8, p. 45-51.

Lord C.J., Johlman C.L., Rhett D.W., (1998) « *Is capillary suction a viable cohesive mechanisms* », *Proc. Eurock 98*, p. 479-485.

Lord J.A., Clayton C.R.I., Mortimore R.N. (2002) « *Engineering in chalk* », CIRIA, Londres.

Magnan J.-P., Mieussens C., Soyez B. (1985) « Essais de compressibilité à l'oedomètre », *Bulletin des Ponts et Chaussées,* vol. 139, p.5-18.

Marcial D. (2003) « Comportement hydromécanique et microstructural des matériaux de barrières ouvragées », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Masson M., (1973) « Pétrophysique de la craie », *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, spécial V, p. 23-48.

Morat P., Le Mouël J.-L., Nover G. & Will G. (1992) « Variation naturelle de la saturation d'une roche de grande porosité induite par la variation saisonnière de la température extérieure et mesurée par voie électrique», *C. R. Acad. Sci. Paris*, vol 315, p. 1083-1090.

Priol G., De Gennaro V., Delage P. & Cui Y.-J. (2004). « On the suction and the time dependent behaviour of reservoir chalks of North Sea oilfields ».Napoli, Workshop Unsaturated soils, accepté pour publication.

Talesnick, M.L., Hatzor, Y.H.& Tsesarsky, M. (2001). «The elastic deformability and strength of a high porosity, anisotropic chalk » *Int. J; of Rock Mech. & Min. Sci.*, vol. 38, p. 543-555.