

Influence de l'eau sur le comportement de la craie

Noémie Lafrance, Mountaka Souley, Christophe Auvray, Vincent Labiouse

► **To cite this version:**

Noémie Lafrance, Mountaka Souley, Christophe Auvray, Vincent Labiouse. Influence de l'eau sur le comportement de la craie. 7. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2014) "Observer, modéliser, décider", Jul 2014, Beauvais, France. ineris-01863826

HAL Id: ineris-01863826

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01863826>

Submitted on 29 Aug 2018

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 DE L'EAU SUR LE COMPORTEMENT DE LA CRAIE

WATER-EFFECT ON THE BEHAVIOUR OF CHALKS

Noémie LAFRANCE^{1,2}, Mountaka SOULEY¹, Christophe AUVRAY², Vincent LABIOUSE³

1 INERIS, Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol - Ecole des Mines, Campus ARTEM, 54000 Nancy, France

2 GeoRessources - Université de Lorraine, 2 rue du Doyen Marcel Roubault, 54518 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

3 Laboratoire de Mécanique des Roches, LMR-ENAC-EPFL, Bâtiment GC C1-413, Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse

RÉSUMÉ — La communication présente les premiers résultats concernant le comportement mécanique en fonction de l'hygrométrie de deux craies en provenance de carrières souterraines du Bassin Parisien. L'influence de l'eau sur la craie à court terme a été mise en évidence à partir d'essais de compression uniaxiale effectués sur des échantillons à divers degrés de saturation correspondant à des humidités relatives variant de 36.5 % à 98 %. Il a été établi pour les deux craies que la résistance en compression simple diminuait lorsque le degré de saturation augmentait. L'effet de l'eau à plus long terme a été également étudié. Il apparaît un vieillissement de la craie lié aux interactions chimiques entre l'eau et la craie. A la variabilité des données près, il a été observé une diminution des masses volumiques (sèche et humide) et de la résistance en compression simple du bord de pilier vers le centre.

ABSTRACT — The paper presents the first results on the mechanical behaviour of two chalks from underground quarries in the Paris Basin depending on the relative humidity of air. The influence of water on the short term was demonstrated from uniaxial compression testings conducted on unsaturated samples for several saturation degrees (corresponding to relative humidity of air from 36.5% to 98%). It has been established that unconfined compressive strength decreased inversely with the degree of saturation. The effect of water on the long term has also been studied. Ageing of chalk seems to be related to water-chalk chemical interactions. Variability of data put aside, It has been stated that physical and mechanical properties evolve considering the range in the pillar: the densities and compressive strength of chalk seems to increase from the pillar centre to the edge.

1. Introduction

La Direction du Risque Sol sous sol de l'INERIS étudie pour le compte du ministère de l'environnement et également dans le cadre d'un de ces axes de recherche l'évolution de deux anciennes carrières souterraines de craie du Nord de la France

partiellement ennoyées (Estreux et Saint-Martin-le-Nœud). Ce travail a été initié par l'instrumentation de ces deux carrières, respectivement en 2004 et en 2009 (Gombert et al. 2013). Le but premier de cette instrumentation était d'étudier l'impact des battements de nappe, donc de l'interaction eau-roche, sur la stabilité de la carrière souterraine. Elle a ensuite été complétée par des caractérisations en laboratoire réalisées à l'Ecole des Ponts (Nguyen 2010), puis à GeoRessources (Lafrance et al. 2014). L'objectif de l'article est de présenter les résultats obtenus en laboratoire relatifs à l'impact de l'eau sur le comportement de la craie à court et à long terme.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériaux

La carrière d'Estreux est située dans le département du Nord, à proximité de la ville de Valenciennes sur la commune de Saint-Saulve (Figure 1). Exploitée par la méthode des chambres et piliers, elle présente des galeries de 2 à 3 m de large et des piliers de section rectangulaire de 1.5 à 4.5m de côté (taux de défrètement $\approx 78\%$ (Nguyen, 2010), recouvrement $\approx 20\text{m}$, contrainte verticale estimée $\approx 1.8\text{ MPa}$). La stratigraphie présente un profil tabulaire. Cette craie d'âge Turonien a la particularité d'être constituée à 24% de glauconie, un minéral argileux de la famille de la muscovite. La porosité est de l'ordre de 35% assez homogène et ses perméabilités à l'air et à l'eau sont respectivement de l'ordre de 10^{-15} et 10^{-16} m^2 . L'échantillonnage pour l'étude de l'influence de l'eau se fait dans des blocs prélevés in situ (masse volumique des grains $= 2.75\text{ g.cm}^{-3}$).



Figure 1. Localisation des sites d'étude

La carrière de Saint-Martin-le-Nœud est située au sud de Beauvais sur la commune de Saint-Martin le Nœud (Figure 1) à flanc de coteau. Exploitée par la méthode des chambres et piliers (recouvrement $\approx 25\text{m}$, contrainte verticale estimée ≈ 1 à 1.5 MPa), elle présente des galeries d'au moins 1.60 m de large et le taux de défrètement est estimé entre 50.4% et 66.5% (Gombert et al, 2010). La stratigraphie présente un profil quasi tabulaire du fait d'un très léger pendage ($\approx 4^\circ$). Elle présente plusieurs lacs souterrains. Cette craie de l'âge Santonien a la particularité d'être constituée à 14% de dolomite. La porosité est de l'ordre de 42% homogène (même gamme de pores) et sa perméabilité à l'air comme à l'eau est de l'ordre de 10^{-15} m^2 . L'échantillonnage pour l'étude de l'influence de l'eau est effectué dans des blocs prélevés in situ en bordure de pilier (masse volumique des grains $= 2.78\text{ g.cm}^{-3}$), au

même titre que pour Estreux. L'échantillonnage pour l'étude du vieillissement s'effectue quant à lui sur des sondages horizontaux SC1 ($z=2.15$ m) et SC3 ($z=1.70$ m) effectués dans un pilier de 3 m de hauteur à différentes cotes z (allant de 0,45 à 2,70 m) par rapport au mur.

2.2. Modes opératoires

2.2.1. Préparation des échantillons

Toutes les éprouvettes considérées dans cette étude ont été extraites par carottage à l'eau perpendiculairement à la stratigraphie. Les éprouvettes destinées à l'étude des effets de l'eau sont prélevées dans le même bloc et sont de diamètre 50 mm. Celles destinées à l'étude du vieillissement sont prélevées perpendiculairement aux sondages tous les 10 cm environ du bord au cœur du pilier (de 0 à 2,4 m) et ont un diamètre de 20 mm. Chacune des éprouvettes obtenues est ensuite rectifiée à l'aide d'une double scie circulaire pour les éprouvettes de diamètre 50 mm et à la scie à fil pour les éprouvettes de diamètre 20 mm de façon à obtenir un élanement 2 et des faces parallèles et lisses. Les éprouvettes sont ensuite placées à 60°C jusqu'à stabilisation de leur masse. Les éprouvettes sont alors instrumentées de manière à mesurer les déformations axiales et latérales pendant les essais mécaniques. Les jauges permettant de mesurer les déformations sont alors collées à la moitié de la hauteur de l'éprouvette en alternant jauges axiale et latérale.

2.2.2. Essais uniaxiaux à hygrométrie contrôlée

Les essais de compression uniaxiale à hygrométrie contrôlée sont réalisés sur des éprouvettes de diamètre 50 mm et d'élanement 2 pour les deux craies. La procédure employée est celle de la norme NF P 94-420. La méthode par phase vapeur est l'unique technique de contrôle d'hygrométrie utilisée dans cette campagne d'essais. L'échantillon de roche une fois instrumenté est placé en contact avec une atmosphère dont l'humidité relative est contrôlée/imposée par une solution saline saturée (Delage et Cui, 2000) à température constante (ici 20°C). Les hygrométries choisies balayent une large gamme de valeurs allant de 36.5% proche de l'état sec à 98%. On s'intéressera particulièrement à la gamme de valeurs 90% - 98% puisqu'il s'agit d'une plage d'hygrométrie retrouvée in situ dans les carrières abandonnées c'est-à-dire sans aérage artificiel (proximité de la nappe à 100% et fluctuation du niveau de la nappe/ennoyage entre 90 et 100%). Les déformations sont enregistrées jusqu'à ce que l'équilibre entre l'air et l'échantillon soit atteint. La solution saline est choisie en fonction du degré d'hygrométrie voulu selon la norme NF EN ISO 483. Les masses volumiques ρ_{Hr} pour chaque hygrométrie sont déterminées suivant la norme NF P 94-410-2 et le degré de saturation S_{r_w} d'un échantillon non saturé a été calculé par rapport à l'échantillon complètement saturé en eau.

Au moment de l'essai, l'échantillon est placé dans une cellule en plexiglas (pas de confinement) au-dessus d'une solution saline de façon à garder l'équilibre entre

l'échantillon et l'atmosphère environnante durant l'essai. L'essai de compression est ensuite effectué avec enregistrement simultané des déformations axiales et latérales des jauges. Les modules de Young ont été déterminés à partir des cycles de déchargement (réponse purement élastique du matériau) suivant un temps de relaxation conformément à la norme NF P 94-425. Il en est de même pour les calculs des coefficients de Poisson.

2.2.3. Caractérisation du vieillissement

Le vieillissement d'une roche est défini comme l'évolution ou la modification de ses propriétés physiques et mécaniques due à une cause anthropique. Le but ici est de caractériser les effets du vieillissement entre la bordure et le cœur d'un pilier. La caractérisation du vieillissement concerne les propriétés physiques et mécaniques de la craie de Saint-Martin-le-Nœud. Cette dernière ne comprend que des essais uniaxiaux (NF P 94-420) sur échantillons secs et saturés instrumentés de diamètre 20 mm et d'élanement 2 prélevés à différentes profondeurs dans le pilier (de 0 à 2,4 m du bord au cœur) et à différentes hauteurs (SC1: haut et SC3: milieu de pilier). Les résultats mécaniques ont été mis en commun avec les masses volumiques sèche ρ_d et saturée ρ_h déterminées à l'aide de la norme NF P 94-410-2.

3. Résultats

3.1. Essais de compression uniaxiale à hygrométrie contrôlée

Les essais de compression uniaxiale à hygrométrie contrôlée ont été effectués sur des éprouvettes provenant de blocs tombés (Estreux) ou pris en bordure de pilier (Saint-Martin-le-Nœud). Les résultats sont résumés sur la Figure 2 et dans les Tableaux 1 et 2. La Figure 2 présente le ratio entre la résistance en compression R_c de l'échantillon non saturé et celle de l'échantillon sec en fonction du degré de saturation, ainsi qu'une comparaison avec les résultats de littérature sur quelques roches exploitées dans les carrières (Watelet 1996). Ce ratio suit la même tendance selon le degré de saturation aussi bien pour Estreux et Saint-Martin que pour les craies en général. La Figure 3 synthétise les essais uniaxiaux à travers les courbes de contrainte-déplacement des échantillons (donné par les capteurs externes) testés pour Estreux et Saint-Martin-le-Nœud. Les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud présentent un ratio $R_c(\text{sat})/R_c(\text{sec})$ respectivement de 0.3 et 0.2. Nguyen (2010) avait quant à lui obtenu un ratio de 0.6 (5.5/9.5) pour la craie d'Estreux.

Les tableaux 1 et 2 présentent les résultats des propriétés mécaniques et physiques en fonction des hygrométries considérées. Les modules élastiques correspondent à une moyenne des mesures effectuées sur les cycles de déchargement (de 3 à 5 cycles par essai).

De manière générale, pour la craie de Saint-Martin, la résistance en compression R_c diminue entre l'état sec et l'état saturé. Néanmoins, en regard des résultats, les modules élastiques ne semblent pas présenter de réelle tendance : l'amplitude des modules entre deux hygrométries reste faible.

Pour Estreux, la résistance en compression R_c diminue entre l'état sec et l'état saturé. Le module de Young suit à peu près la même tendance. Le coefficient de Poisson ν ne semble pas présenter de tendance nette.

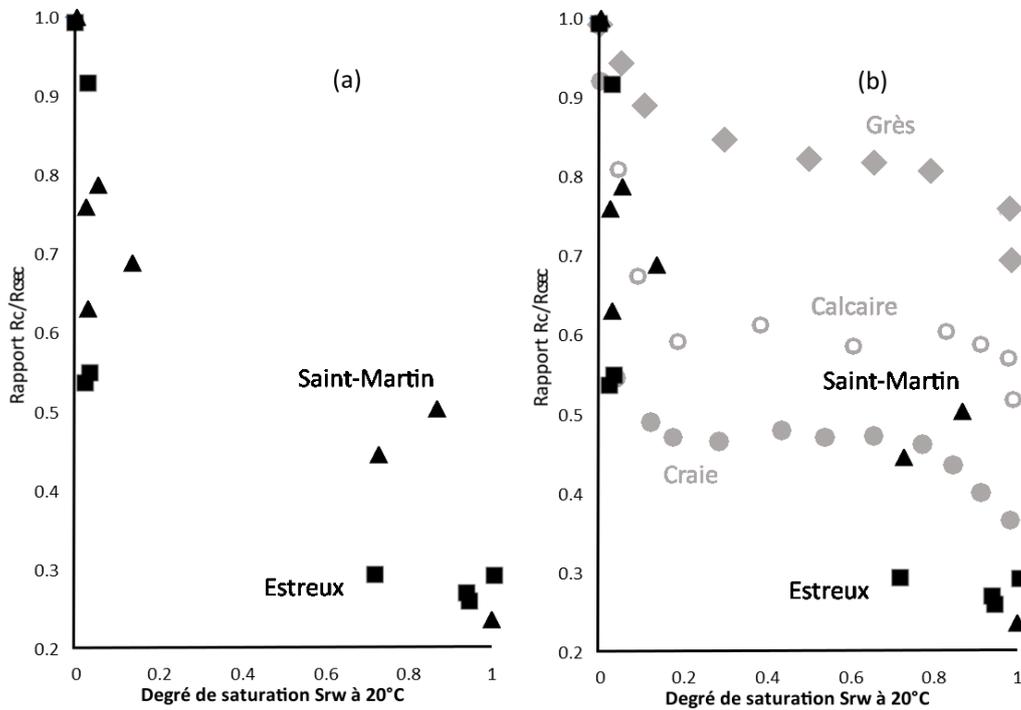


Figure 2. Ratio de résistance $R_c(Hr)/R_c(sec)$ en fonction du degré de saturation S_{rw} à 20°C. (a) craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Noeud, (b) comparaison avec des données de littérature (Watelet 1996)

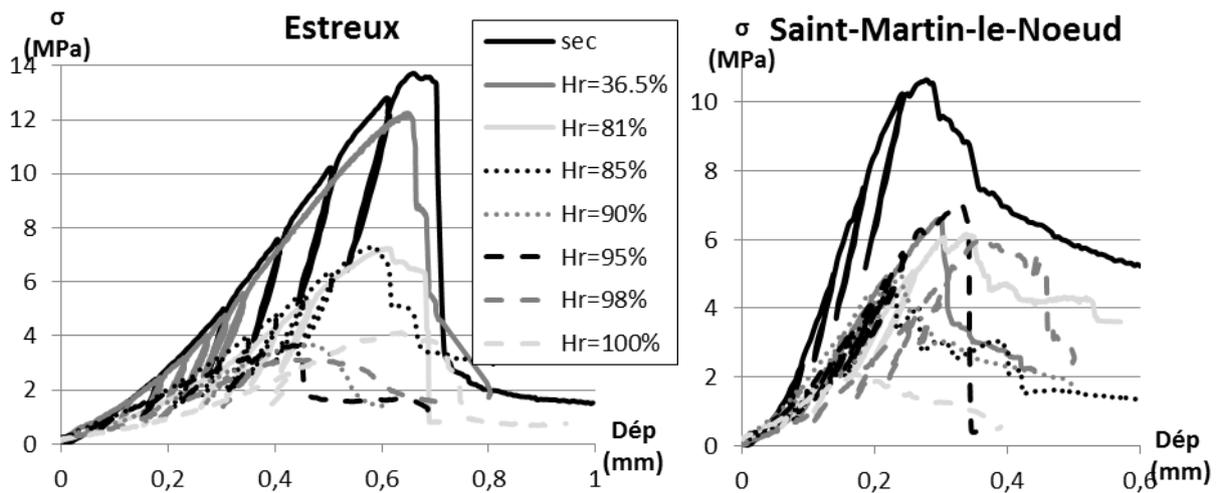


Figure 3. Représentation graphique du déviateur en fonction du déplacement pour toutes les hygrométries considérées

Tableau 1. Résultats des essais uniaxiaux à hygrométrie contrôlée: craie de Saint-Martin-le-Noeud

Hygrométrie Hr (%)	Propriétés mécaniques			Propriétés physiques		
	Rc	E	ν	ρ_d (avant saturation)	ρ_h	ρ_{Hr}
	(MPa)	(GPa)	-	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)
Sec	11	10.0	0.18	1.53	-	-
36.5	7	7.0	0.21	1.52	-	1.53
81	6	7.4	0.27	1.58	1.89	1.60
85	5	7.8	0.27	1.54	-	1.54
90	5	9.9	0.20	1.54	-	1.55
95	7	7.6	0.24	1.54	-	1.55
98	5	10.9	0.21	1.69	1.97	1.91
Saturé	2	11.3	0.19	1.53	1.88	-

Tableau 2. Résultats des essais uniaxiaux à hygrométrie contrôlée: craie d'Estreux.

Hygrométrie Hr (%)	Propriétés mécaniques			Propriétés physiques		
	Rc	E	ν	ρ_d (avant saturation)	ρ_h	ρ_{Hr}
	(MPa)	(GPa)	(-)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)	(g.cm ⁻³)
Sec	13	7.5	0.25	1.79	-	-
36.5	12	5.1	0.19	1.85	2.13	1.86
81	7	5.1	0.21	1.75	-	1.76
85	7	5.7	0.21	1.73	2.03	1.74
90	4	3.5	0.17	1.70	1.88	1.98
95	4	3.5	0.25	1.69	1.96	1.94
98	3	3.3	0.20	1.76	2.05	2.03
Saturé	4	3.4	0.18	1.79	2.08	-

3.2. Essais sur le vieillissement de la craie de Saint-Martin-le-Noeud

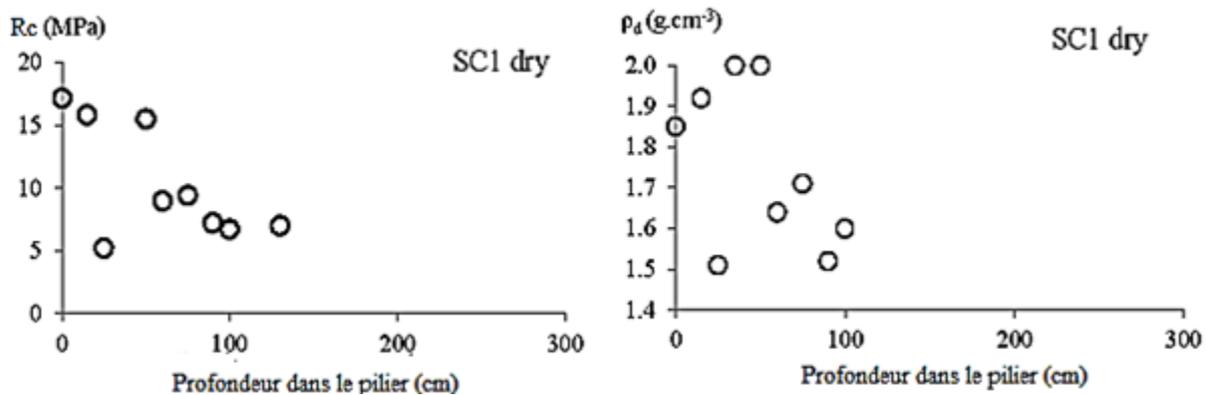
La Figure 4 illustre l'évolution de la résistance à la compression simple et de la masse volumique de la craie de Saint-Martin-le-Noeud en fonction de la profondeur dans le pilier. Chaque point représente un échantillon prélevé soit dans le forage SC1 soit dans le forage SC3.

Dans le cas du forage SC1 (Figure 4a), on constate une augmentation de la résistance et de la densité de la craie lorsqu'on se rapproche du bord de pilier. Dans le cas des échantillons secs de SC3 (Figure 4b), de 0 à 1 m, la craie voit une résistance légèrement en baisse voire quasi constante. De 1 à 2,4 m, la résistance à la compression Rc tend à diminuer dès lors que l'on se rapproche du cœur de pilier.

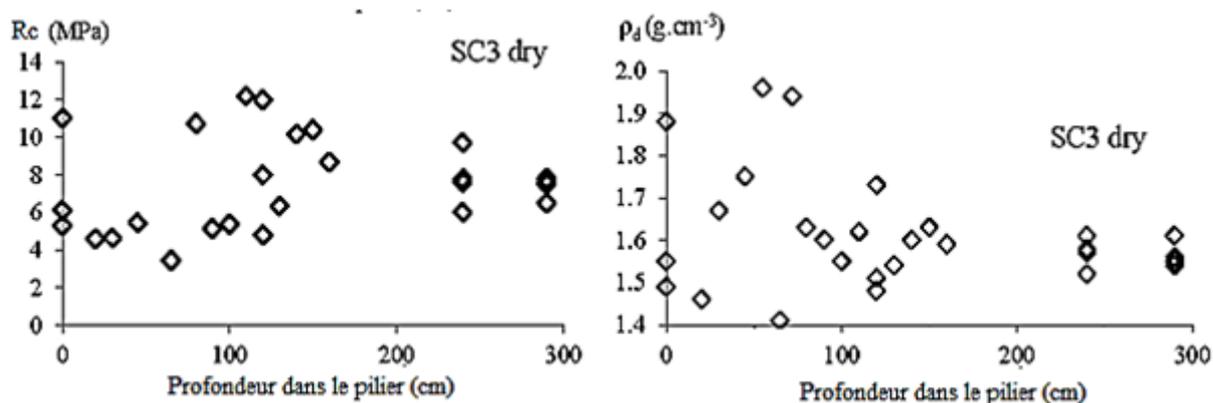
Les résultats de masse volumique sèche ρ_d (Figure 4b) se présentent sous la forme d'un fuseau, sans réelle tendance, s'élargissant dès lors que l'on se rapproche du bord du pilier.

Pour les échantillons saturés de SC3 (Figure 4c), la craie saturée semble plus résistante et plus dense en bordure qu'au cœur de pilier. La dispersion dans les masses volumiques au bord est ici amoindrie par rapport à l'état sec.

a) échantillons secs prélevés dans le forage SC_1



b) échantillons secs prélevés dans le forage SC_3



c) échantillons saturés prélevés dans le forage SC_3

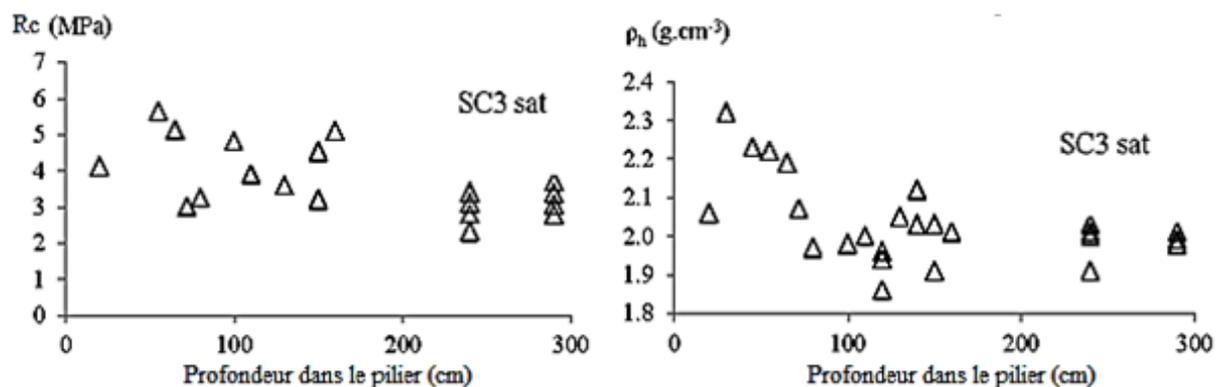


Figure 4. Effets du vieillissement sur la résistance en compression et la masse volumique en fonction de la profondeur dans le pilier

4. Discussion

Les résultats ont montré que les deux craies bien que de propriétés physiques similaires à d'autres craies (Hjuler et al. 2009, Nadah et al. 2013, Homand et Shao 2000) ont un comportement complètement différent dès lors que l'état de saturation est mis en jeu. D'un point de vue global, la résistance en compression des craies diminue en fonction de l'état de saturation (Figure 2). Ce phénomène est typique des craies et a déjà été mis en évidence sur d'autres craies, comme celle de Lixhe ou de Mer du Nord par exemple (Watelet 1996, Nguyen 2010, Schroeder et al. 2003, Homand et Shao 2000, Schroeder et Shao 1996). Les modules de déformabilité ne semblent cependant pas suivre cette tendance pour les deux craies (Tableaux 1 et 2). Les résultats concernant la première sont cohérents avec les observations faites par Nguyen (2010) sur cette même craie.

La craie d'Estreux présente un comportement plutôt ductile s'accroissant avec la présence d'eau et la craie de Saint-Martin, peu importe le degré de saturation, a un comportement plutôt fragile. Cette évolution peut s'expliquer par la composition minéralogique des craies: Monjoie et al. (1990) ont observé une amélioration des propriétés mécaniques dès lors que la craie est riche en silice. La ductilité de la craie d'Estreux peut donc être reliée à la glauconie et la rigidité de Saint-Martin à la dolomie. La pente de la courbe contrainte-déplacement (Figure 3) pour la craie d'Estreux diminue au fur et à mesure que l'hygrométrie augmente et le déplacement maximal avant rupture ne diffère pas beaucoup d'une hygrométrie à l'autre (de 0 à 85% et 100%, de 90% à 98%). D'après Josa et al. 1987, Delage et al. 1996, Nguyen 2010 les changements d'hygrométrie, implicitement changement de l'état de saturation, engendrent des déformations volumiques. Cette affirmation est corroborée par une dilatance et des déformations volumiques d'autant plus marquées sur les courbes contrainte-déformation (non présentées ici).

Pour Saint-Martin-le-Nœud (Figure 3), la pente et l'hygrométrie ne semblent pas corrélées: les courbes contrainte-déplacement pour la plupart des hygrométries (36.5% à 90%) se retrouvent dans le même domaine. Seules les courbes contrainte-déplacement correspondant aux extrêmes (0 et 100%) et à 98% d'hygrométrie semblent se détacher des autres : à sec et 98% avec une pente moindre mais pas de changement dans le déplacement maximal, à 100% avec un déplacement maximal moindre mais pas de changement dans la valeur de la pente. Ce détachement des courbes peut s'expliquer en partie par le phénomène de capillarité : de 36.5% à 90%, les pores de la craie ne sont pas entièrement saturés et un équilibre s'établit entre l'eau et l'air présent dans la roche. Proche de la saturation (98% à 100%), la quantité d'air diminue dans la roche et seuls les gros pores ne sont pas complètement remplis d'eau. L'eau exerce une pression à l'intérieur des pores et participe à la perte de cohésion de la roche vu les différences observées entre état sec et état saturé. Cependant de 36.5% à 90%, l'eau ne semble pas influencer de manière significative la raideur de la craie de Saint-Martin à l'instar de celle d'Estreux. Ceci implique qu'au niveau de la microstructure de la craie de Saint-Martin-le-Nœud, soit les liaisons électrostatiques (Schroeder et al. 2003) entre les grains ne sont pas ou difficilement

rompues en présence d'eau, soit le contact solide-solide entre grains est prépondérant par rapport aux liaisons électrostatiques. Les battements de nappe actuels et les changements de saison (Gombert et al. 2013) ont pour conséquence de faire varier l'hygrométrie des carrières entre 85% et 100%. Ces variations impliquent au vu des résultats que le comportement mécanique des craies évoluera en fonction des saisons, de manière plus accentuée pour la craie d'Estreux que pour celle de Saint-Martin.

Compte tenu des résultats sur le vieillissement de la craie dolomitique (Figure 4), pour une même profondeur, le ratio des résistances entre état sec et état saturé est relativement constant et proche de 2. A la variabilité des données près, il a été observé une diminution des masses volumiques sèche et humide (sauf pour SC3 à l'état sec) et de la résistance en compression simple en allant de la bordure au cœur de pilier. Ce qui traduit que le vieillissement de la craie de la carrière de Saint-Martin-le-Noeud diffère de la tendance généralement observée dans les géomatériaux. Une des hypothèses avancée serait une circulation d'eau (sous forme liquide) préférentielle plus importante en cœur de pilier qui aurait favorisé une dissolution des grains. Cette hypothèse est confortée par la différence de taille de grains entre le cœur (grains de taille réduite avec des traces de dissolution) et la bordure du pilier (grains intacts) observée par des analyses au MEB (Lafrance et al. 2014). Ces résultats sont étayés par une étude réalisée par le Ministère Wallon de l'Equipement et des Transports (Funcken & Welter 1996) montrant des variabilités de résistance similaires pour une craie phosphatée (carrière de la Malogne, Belgique). De plus, selon Gombert et al. (2013), le bord de pilier est davantage soumis à des variations d'hygrométrie (contact à l'air) que le cœur de pilier, ce qui peut expliquer en partie les différences observées entre cœur et bord de pilier.

5. Conclusion

En conclusion, l'eau ne semble pas influencer de la même façon les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Noeud. Là où la craie dolomitique de Saint-Martin-le-Noeud est raide et peu sensible à l'eau, la craie glauconieuse d'Estreux se déforme d'autant plus que le matériau est saturé en eau. Selon Gombert et al. 2013, les battements de nappe au fil du temps gagneront en amplitude et en fréquence, provoquant des changements brutaux d'hygrométrie au sein de la carrière. En comparaison des résultats d'essais sur le vieillissement, ceci implique qu'au fil du temps et des saisons, les piliers évolueront de façon différentielle entre leur bord et leur cœur, et que la craie se distingue des autres géomatériaux.

Remerciements

Les auteurs remercient Mlle Favreau O., MM. Schoumacker L. et Moumni M. de GeoRessources pour leur participation active à l'obtention des résultats.

Références bibliographiques

Delage P. et Cui Y.J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. Techniques de l'Ingénieur, c301.

- Delage P., Schroeder C., Cui Y.J. (1996). Subsidence and capillary effects in Chalk. Eurock 96, Prediction and performance on rock mechanics and rock engineering. Turin, Italy. 1291-1299
- Gombert P., Watelet J.-M., Al Heib M., Didier C. 2010. Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines: Bilan des données de l'année 2009. INERIS-DRS-10-95052-00919A
- Gombert P., Auvray C., Al Heib M. (2013). In-situ and laboratory tests to evaluate the impact of water fluctuations on stability of underground chalk mines. Proceedings of the 14th International Symposium on Water-Rock Interaction, WRI 14. Avignon, France. June 09-14.
- Hjuler & Fabricius IL. (2009). Engineering properties of chalk related to diagenetic variations of upper cretaceous onshore and offshore chalk in the North sea area. Journal of Petroleum Science Engineering, 68, 151-70
- Homand S., Shao, J.-F. (2000) Mechanical behaviour of a porous chalk and effect of saturating fluid. International Journal of Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 5, 583-606
- Josa A., Alonso E.E., Gens A., Lloret A. (1987). Stress-strain behaviour of partially saturated soils. Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 561-564
- Lafrance N., M. Souley, C. Auvray, O. Favreau & V. Labiouse (2014) - « Ageing of chalk rocks in underground quarries », Vigo, 27-29th May 2014, Spain
- Funcken L. et PH. Welter. (1996) : « Procès-verbal relatif aux résultats de l'étude générale de stabilité effectuées pour la S.N.C.B. sous la ligne 96A : Mons-Queva (entre les Km 64100 et 64500) dans les anciennes exploitations souterraines de craie phosphatée (Zone 5-6) de la Malogne à Cuesnes (Mons) », T-910-C312/13, 38 pages ;
- Monjoie A., Schroeder C. (1990). Establishment of constitutive laws of chalks and long term tests. Proceedings of the 3rd North Sea Chalk Symposium. Copenhagen, Denmark.
- Nadah J., Bignonnet F., Davy C.A., Skoczylas F., Troadec D., Bakowski S. (2013). Microstructure and poro-mechanical performance of Haubourdin chalk. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 58, 149-165.
- Nguyen H.D. (2010). Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie. Thèse Universitaire. Ecole des Ponts.
- Schroeder C. et Shao J.-F. (1996). Plastic deformation and capillary effects in chalks. 5th North Sea Chalk Symposium, Reims, France.
- Schroeder C. (Coordinator) (2003). Mechanical behaviour of partially and multiphase saturated chalks and fluid-skeleton interaction : Main factor of chalk oil reservoirs compaction and related subsidence. Final report of the EU project (PASACHALK2)
- Watelet J.-M. (1996). Méthode d'analyse et diagnostic des conditions de stabilité des carrières souterraines. Engineering Diploma Work. ISAM-SNAM. Paris