



HAL
open science

Comportement à long terme de la craie

Jean-Bernard Kazmierczak, Farid Laouafa

► **To cite this version:**

Jean-Bernard Kazmierczak, Farid Laouafa. Comportement à long terme de la craie. Rapport Scientifique INERIS, 2010, 2009-2010, pp.98-100. ineris-01869288

HAL Id: ineris-01869288

<https://ineris.hal.science/ineris-01869288>

Submitted on 6 Sep 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.

Comportement à long terme de la craie



J. B. Kazmierczak/F. Laouafa

Les recherches menées sur la craie sont motivées par l'existence sur le territoire français de nombreux vides souterrains d'origine anthropique (carrières) ou naturelle (résultant de dissolution) dans ce matériau. L'existence de ces vides pose naturellement la question de leur devenir, de leur comportement et de leur stabilité à court comme à long terme. Le comportement mécanique de la craie est sensible à l'environnement hydrique dans lequel elle se trouve. Ce matériau possédant une matrice poreuse, des transferts de masses, de fluides ou de chaleur se développent en son sein. Les mécanismes de transfert ainsi que leur cinétique dépendent de l'atmosphère ambiante et des différents équilibres thermodynamiques entre les différentes phases (solide, liquide,

gaz). La craie est très sensible au degré de saturation (proportion de liquide dans le volume poreux), non seulement d'un point de vue chimique mais aussi mécanique. En fonction des composantes minéralogiques, sur le long terme, des phénomènes de dissolution peuvent se produire et contribuer à la diminution de la résistance des ouvrages souterrains (piliers, par exemple) par une augmentation du volume poreux. Pour appréhender correctement ces comportements, des essais ont été réalisés à différentes échelles en laboratoire et *in situ*. Ils mettent en œuvre des dispositifs très sophistiqués tels qu'un Microscope Électronique à Balayage Environnemental couplé à une platine de compression et à des appareillages de terrain plus classiques (capteurs d'humidité, extensomètres).

LE MATÉRIAU

La craie d'Estreux est une roche sédimentaire, datée du Crétacé supérieur. Généralement blanche et poreuse, elle contient des fractions argileuses, riches en glauconie, d'où sa couleur gris-vert.

La microstructure de la craie d'Estreux est présentée sur la **figure 1**. On peut y observer un coccolithe entier de diamètre de l'ordre de 5 μm , des plaquettes de coccolithes cassées de dimensions diverses (entre 0,5 et 2,5 μm) et des pores de formes variées. On remarque que les pores sont regroupés en deux groupes : des gros pores de formes convexes et de petits pores de formes variées. Les petits pores ont une dimension comparable au diamètre moyen d'accès obtenu par la technique du porosimètre (1,4 μm).

LES ESSAIS DE LABORATOIRE

Divers travaux menés dans le cadre d'un programme de recherche ont permis d'analyser les mécanismes de dégradation ou d'altération des propriétés mécaniques de la craie (craie d'Estreux). Des changements imperceptibles à l'œil nu (microdissolution, augmentation modérée de la porosité, microfissurations) pouvant être à l'origine d'une diminution des caractéristiques de résistance mécanique de la roche sont ainsi analysés au MEBE. Des essais de traction-compression uniaxiaux à une échelle « micro » ont été effectués dans le MEBE à l'aide d'une platine spécifiquement

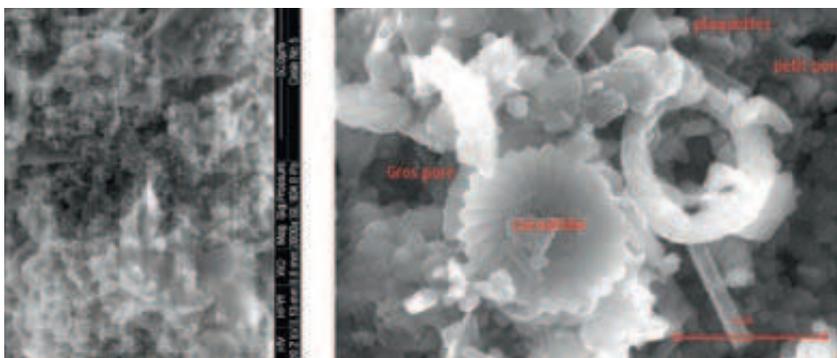


FIGURE 1

IMAGES DE LA CRAIE D'ESTREUX AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE ENVIRONNEMENTAL (MEBE)

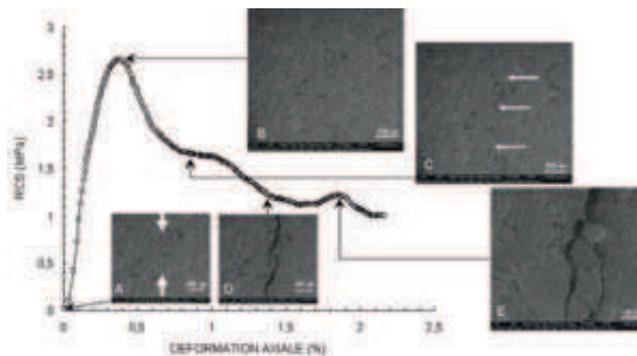


FIGURE 2

ESSAI MICROMÉCANIQUE DE COMPRESSION UNIAXIALE DANS LE MEBE SUR UN ÉCHANTILLON DE CRAIE SATURÉE EN EAU (A) : au pic de résistance, la surface de l'échantillon est identique à celle de l'échantillon intact (B) : à environ 0,9 % de déformation axiale, en phase de radoucissement, une fracture pseudo-verticale devient apparente (C) avec une ouverture progressive dans la phase post rupture (D) et (E). Platine de compression (à gauche). Les images sont réalisées à partir d'un agrandissement de x37 (A) jusqu'à x310 (E). Elles concernent à la fois la mésostructure et la microstructure de la craie.

développée à cet effet. On présente, pour un échantillon saturé en eau, l'évolution des mécanismes de rupture au cours de la sollicitation « micromécanique » (figure 2).

Les analyses effectuées lors de ces recherches mettent en évidence les couplages visco-hydromécaniques complexes dus à l'action de l'eau et à l'effet du temps. L'eau modifie l'état de contrainte de la craie, provoque l'affaiblissement généralisé de celle-ci et réduit son domaine élastique (figure 4). On observe également une réduction de la résistance avec le temps. L'envahissement d'eau et la faible vitesse de déformation (de l'ordre de $10^{-12}/s$) d'un massif (phénomènes rencontrés dans la nature) ont des effets défavorables sur la résistance de la craie.

Dans le cadre de ces recherches plusieurs aspects ont été examinés :

- l'effet de l'eau : les études des couplages hydromécaniques, basées sur les concepts de sols non saturés. Ce travail

permet de proposer et de développer des dispositifs qui sont nécessaires et recommandés pour une bonne caractérisation du comportement hydromécanique de la craie en laboratoire. Dans le cadre partiellement saturé, la signature hydrique ou courbe de rétention de la craie d'Estreux a été construite (figure 3) ;

- l'effet du temps : cet effet a été étudié à partir de plusieurs types d'essais tels que le fluage, la relaxation à différentes vitesses de déformation et/ou de chargement. Ces essais mettent en évidence la dépendance du comportement de la craie vis-à-vis de la vitesse de sollicitation ;
- la microstructure de la craie : ces études ont montré que la craie est un milieu poreux avec des vides, de l'eau et des grains de calcite. La cimentation est présente entre ces grains. Des mécanismes de dissolution, transport et précipitation se manifestent en surface de l'échantillon ;
- les modèles de comportement de la

craie : plusieurs modèles constitutifs ont été analysés et développés pour décrire le comportement prenant en compte la vitesse de sollicitation ainsi que l'effet de la succion – différence entre pression de l'air et pression du fluide.

LES MESURES *IN SITU*

Dans la carrière d'Estreux, l'hygrométrie ambiante et les évolutions du niveau de la nappe phréatique, liées aux cycles saisonniers, sont les deux facteurs principaux à l'origine des changements d'hydratation dans la craie. Des mesures effectuées *in situ* depuis 2004 révèlent que la température dans la galerie est relativement stable, voisine de 11 °C, mais que l'humidité relative varie entre 80 % et 100 %.

L'instrumentation du site d'Estreux a été réalisée dans l'objectif d'étudier le comportement à long terme de la craie dans son environnement naturel, au sein d'une carrière souterraine abandonnée.

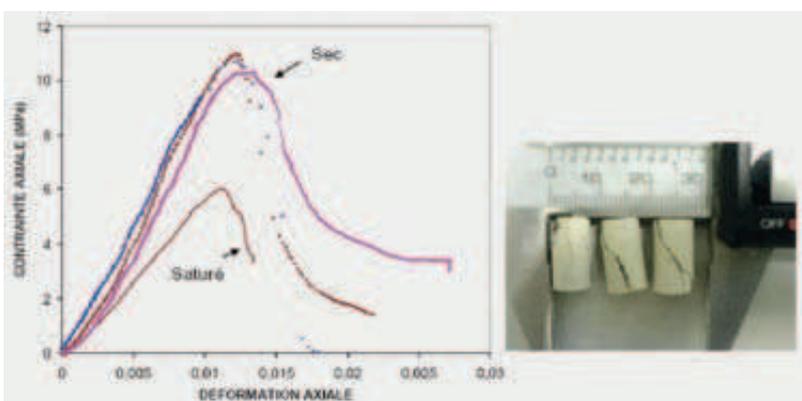


FIGURE 4

RÉSISTANCE EN COMPRESSION SIMPLE POUR DIFFÉRENTS DEGRÉS DE SATURATION ET PHOTOS DES MICROÉCHANTILLONS APRÈS RUPTURE (ESSAIS MICRO)

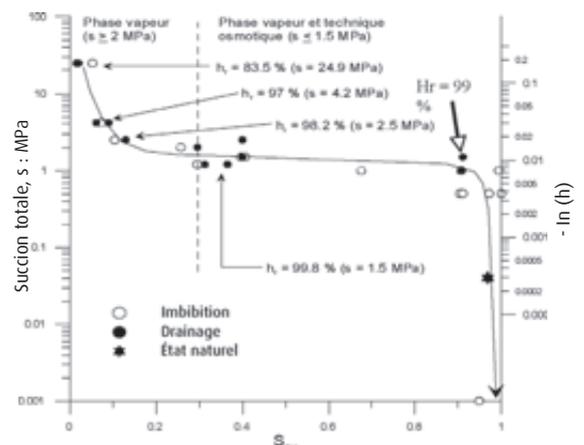


FIGURE 3

COURBE DE RÉTENTION D'EAU DE LA CRAIE D'ESTREUX (S_{rw} : degrés de saturation, S : succion, Hr : humidité relative)

Elle a vocation à décrire, dans le temps, l'évolution temporelle de paramètres tels que la température, l'humidité, la pression interstitielle et la déformation des piliers ; paramètres caractérisant ou affectant le comportement et les propriétés mécaniques du massif et/ou de l'ouvrage souterrain.

Des mesures effectuées *in situ* sur ce pilier montrent en particulier que la variation de la pression capillaire en profondeur nécessite un délai pour se propager au cœur du pilier.

RÉSULTATS

L'analyse au Microscope Électronique à Balayage Environnemental a permis d'effectuer des essais dans une atmosphère à hygrométrie contrôlée. La mise au point d'un dispositif de chargement mécanique au sein du MEBE a permis de réaliser des essais de compression uniaxiale sur des « micro-éprouvettes ». On a montré l'intérêt de l'utilisation de ce type de microscope pour l'observation des géomatériaux dans des contextes multiphasiques et multiphysiques, tels ceux rencontrés par les craies. Des phénomènes comme la création de fissures lors de phases d'hydratation, l'approfondissement et l'élargissement de dépressions

assimilables aux pores ont ainsi pu être observés. Ces résultats originaux encouragent l'utilisation de cet outil dans le domaine de la géotechnique. Les essais hydromécaniques, effectués en laboratoire, à l'aide de méthodes spécifiques (phase vapeur et pression osmotique) fournissent des données essentielles telle que la courbe de rétention d'eau du matériau par exemple. Cette dernière traduit le comportement « hydrique » du matériau poreux et laisse entrevoir quelle pourrait être l'interaction entre la roche et l'eau dans le terrain en place. D'autres essais plus conventionnels, menés sur de petites éprouvettes de craie, ont mis en évidence la dépendance de la réponse mécanique vis-à-vis de la succion et de la vitesse de sollicitation. Ainsi, la résistance apparaît être une fonction de la vitesse de sollicitation et de la valeur de succion régnant au sein du matériau. En d'autres termes, le domaine d'élasticité (critère de plasticité) croît avec la succion et la vitesse de sollicitation. L'extrapolation des résultats suggère qu'il y a une diminution significative de la résistance du matériau lorsque la vitesse de la sollicitation est très faible. Cela est très important, car en

carrières souterraines, la vitesse de sollicitation est souvent très faible, accompagnée d'une hygrométrie élevée, et peut donc avoir pour conséquence une diminution de la résistance des piliers ou de celle du toit et du mur. Par ailleurs, alors que la convergence du toit et du mur apparaît clairement linéaire (avec toutefois des vitesses très faibles), les extensomètres placés dans le pilier présentent des variations cycliques saisonnières (en plus d'une tendance globale linéaire) *a priori* impossible à corrélérer avec les températures mesurées, la pluviométrie (hygrométrie, niveau de la nappe, poids d'eau dans les terrains de surface, etc.) ou la pression atmosphérique. Les variations des grandeurs mesurées : température, déplacement, pression, bien que faibles, mettent en évidence des tendances d'évolution, certes très lentes mais logiques. Ces évolutions s'expliquent parfaitement dans le contexte des carrières abandonnées à faible profondeur où la variation des sollicitations d'origine hydraulique, mécanique ou thermique est faible. Ces différents éléments permettent d'imaginer les conséquences du changement climatique attendu sur le devenir de ces ouvrages.

ABSTRACT

Chalk mine pillars are submitted to mechanical loading and to variations of water saturation that can be due to seasonal environmental changes as water level fluctuations, hygrometry, temperature or atmospheric pressure. Hydraulic modifications may affect the long term stability of pillars. In order to analyze the behaviour and strength of such material, several experimental investigations at different scales (microscopic, mesoscopic and macroscopic) have been conducted on saturated, partially saturated and dry chalk samples. The microscopic scale analysis was performed in an Electron Scanning Environmental Microscope (ESEM). Water retention properties and a series of high pressure controlled suction odometer mesoscopic compression tests were carried out on chalk samples extracted from a pillar. The macroscopic scale concerns the monitoring of several variables (temperature, moisture, strains) in a pillar of the abandoned Estreux chalk mine (France). These three scales were considered in order to determine accurately the general features of the chalk hydromechanical behaviour. The potential impact of the water content variations on the mechanical behaviour of the chalk has been realized based in the frameworks of the classical unsaturated soils mechanics. Suction hardening was clearly identified, resulting in increasing yield stresses with suction. Collapse under wetting at constant applied vertical load was also observed. Rate dependency and two principal failure modes (shear and pore collapse) were observed and formalized. In situ observation shows irreversible displacement and strains evolution with hygrometry.

RÉFÉRENCES

- [1] Auvray C. (2003). Vieillessement et comportement rhéologique du gypse. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine: 265.
- [2] Sorgi C., De Gennaro V. (2007). Analyse microstructurale au MEB environnemental d'une craie soumise à chargement hydrique et mécanique. C. R. Geoscience 339, 468-481.
- [3] Nguyen H. D., De Gennaro V., Delage P., Sorgi C. (2008). Retention and compressibility properties of a partially saturated mine chalk. First European Conference on Unsaturated Soils, Durham.
- [4] Nguyen, H. D. (2009). Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie. Thèse École des Ponts, ParisTech.