



HAL
open science

Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie

Noémie Lafrance

► **To cite this version:**

Noémie Lafrance. Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie. Autre [cond-mat.other]. Université de Lorraine, 2016. Français. NNT : 2016LORR0059 . tel-01752257

HAL Id: tel-01752257

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752257>

Submitted on 29 Mar 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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITE DE LORRAINE
École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy
Laboratoire GeoRessources
École Doctorale RP2E

THESE

Présentée en vue du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE
en Mécanique - Génie Civil

Par

Noémie LAFRANCE

Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie

Soutenue publiquement le 30 Mars 2016

devant le jury composé de

M. Jacques PIRONON	Directeur de Recherche CNRS – Université de Lorraine	Président
M. Dashnor HOXHA	Professeur – Université d'Orléans	Rapporteur
M. Christian SCHROEDER	Professeur – Université Libre de Bruxelles	Rapporteur
Mme Danièle VALDÉS-LAO	Maître de Conférences – Université Pierre et Marie Curie	Examineur
M. Mountaka SOULEY	Ingénieur de Recherche HDR – INERIS	Directeur de thèse
M. Christophe AUVRAY	Ingénieur de Recherche – Université de Lorraine	Co-directeur de thèse
M. Vincent LABIOUSE	Professeur – Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg	Invité
M. Jean-Marc WATELET	Ingénieur géotechnicien – INERIS	Invité



UNIVERSITE DE LORRAINE
École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy
Laboratoire GeoRessources
École Doctorale RP2E

THESE

Présentée en vue du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE
en Mécanique - Génie Civil

Par

Noémie LAFRANCE

Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie

Soutenue publiquement le 30 Mars 2016

devant le jury composé de

M. Jacques PIRONON	Directeur de Recherche CNRS – Université de Lorraine	Examineur
M. Dashnor HOXHA	Professeur – Université d'Orléans	Rapporteur
M. Christian SCHROEDER	Professeur – Université Libre de Bruxelles	Rapporteur
Mme Danièle VALDÉS-LAO	Maître de Conférences – Université Pierre et Marie Curie	Examineur
M. Mountaka SOULEY	Ingénieur de Recherche HDR – INERIS	Directeur de thèse
M. Christophe AUVRAY	Ingénieur de Recherche – Université de Lorraine	Co-directeur de thèse
M. Vincent LABIOUSE	Professeur – Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg	Invité
M. Jean-Marc WATELET	Ingénieur Géotechnicien – INERIS	Invité

*« Pierre, obscure compagnie
Sois bonne enfin, sois docile
Ce n'est pas si difficile de devenir mon amie
Quand je sens que tu m'écoutes
C'est toi qui me donnes tout.
Tu es distraite, tu pèses,
Tu me remplis la main d'aise
Et d'une douceur sans bruit.
Le jour, tu es toute chaude,
Toute sereine la nuit,
Autour de toi mon cœur rôde,
Le tien qui s'est arrêté
Me ravit de tous côtés. »*

— Jules Supervielle, Le Forçat innocent

À ma grand-maman du Québec,

À mon filleul Ludovic,

À ma famille,

À mes amis

Remerciements

Cher lecteur,

Laissez-moi adresser, en guise de préambule à ce mémoire, mes remerciements les plus sincères aux personnes m'ayant accompagnée tout au long de cette aventure de presque quatre ans qu'a été la thèse. En effet, il s'agit d'une période de quête intense aussi riche sur le plan scientifique que personnel, et ce travail de recherche ne saurait (en aucun cas !!) se définir comme le fruit d'un travail solitaire.

C'est donc avec le cœur serré mais le sourire aux lèvres que je fais le bilan, semblant bien faible face à mon ressenti réel (moi trop émotive ? non pas du tout...), de cette aventure et que j'entreprends ma dernière tâche de rédaction.

Je tiens avant toute chose à remercier infiniment mon directeur de thèse, Monsieur Mountaka Souley de l'INERIS, pour toute son aide. Un immense merci à lui pour m'avoir guidée, encouragée et toujours été présent dans les moments difficiles. Je lui suis profondément reconnaissante pour son soutien autant scientifique que moral ainsi que le temps qu'il a investi dans la direction de cette recherche. Je remercie également mon co-directeur de thèse Monsieur Christophe Auvray pour son aide expérimentale (et morale), et ses conseils avisés ! Je les remercie tous deux chaudement pour leur franchise, leur bienveillance et leur exigence.

Les échanges avec les membres du Jury m'ont ouverte à de nouvelles perspectives et j'ai apprécié de discuter avec eux lors de la phase de questions. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Jacques Pironon, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'avoir présidé mon Jury. Un grand merci à Messieurs Christian Schroeder et Dashnor Hoxha d'avoir accepté la lourde tâche de rapporter ce travail, mais aussi de l'avoir jugé et estimé. J'en suis très honorée. J'associe à ces remerciements Madame Valdés-Lao pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour m'avoir permis d'élargir ma vision sur l'hydrogéologie de Saint-Martin-le-Nœud ! Un grand merci également à Messieurs Vincent Labiouse et Jean-Marc Watelet pour avoir accepté de faire partie de mon Jury et pour avoir évalué ce travail. J'espère pouvoir les revoir au détour d'un congrès !

Ce travail n'aurait cependant pu voir le jour sans le partenariat entre deux entités : l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS) et l'UMR 7359 GeoRessources.

Mes remerciements vont à toute l'équipe de la Direction du Sol et du Sous-Sol de l'INERIS qui a permis la réalisation de ce projet. Un immense merci à Messieurs Mehdi Ghoreychi, Christophe Didier et Jean-Bernard Kazmierczak qui m'ont

acceptée dans l'équipe et qui n'ont cessé de croire en mes capacités et dans le potentiel de ce travail. Merci à eux de m'avoir soutenue dans les moments difficiles, de m'avoir accordée leur bienveillance et d'avoir eu foi dans ce travail aux (nombreux) moments où la mienne me faisait défaut. Merci encore pour tous les échanges scientifiques animés, mais toujours dans la bonne humeur !

Je remercie également toute l'équipe de Verneuil de m'avoir toujours accueillie les rares fois où je remontais dans la maison mère et l'équipe de Nancy basée à l'École des Mines, sous la bienveillance de Monsieur Pascal Bigarré, pour tous les moments chaleureux que j'ai pu passer avec eux. Je tenais à remercier Madame Christine Couverchel, Messieurs Marwan Al-Heib, Vincent Renaud, Alain Thoraval, Philippe Gombert et bien d'autres pour leurs encouragements, bienveillance et soutien (les deux derniers en particulier pour les répétitions de la soutenance) ! Je remercie également tous les membres du secrétariat, en particulier Mesdames Brigitte Sellouma, Catherine Pajor et Virginie Monnier, ainsi que ma très chère Danièle Kling. Un grand merci à Mesdames Alice Tonnelier, Roxane Cherkaoui, Marie Degas, Roxane Muller (coupine de cosplay !), Stella Coccia, Isabelle Contrucci, Messieurs Mustapha Bennani, Cyrille Balland, Nicolas Spitzensteder, Régis Pacot, Armand Lizeur, Franz Lahaie, Farid Laouafa, Christian Bouffier, Benoît Beaufiles et Régis Toussaint !

J'ai eu la chance de côtoyer dans le même bâtiment le personnel de l'équipe GOR du laboratoire GeoRessources. Je tenais à remercier en particulier Messieurs Thierry Verdel, Olivier Deck et Yann Gunzburger pour s'être toujours enquis avec bienveillance de l'avancement de mon travail et de m'avoir permis de prendre un certain recul sur la vie de thésard. Ma gratitude va également à Mesdames Marianne Conin et Brigitte Siatka (ah... chère Brigitte), Messieurs Christian Marignac, Jack-Pierre Piguet et Bernard Laumonier pour leurs conseils et encouragements, ainsi que les nombreux débats (des moments mémorables) aux pauses café !!

L'expérimentation a été réalisée dans sa quasi-totalité au sein du bâtiment E de l'École de Géologie. Mes remerciements vont donc à toute l'équipe HGM de GeoRessources, et en particulier à Monsieur Albert Giraud pour m'y avoir accueillie ! Un grand merci à Madame Anne-Julie Tinet, Messieurs Luc Scholtès, Fabrice Golfier, Dragan Grgic, Michel Buès et Constantin Oltean pour les nombreuses discussions aussi bien « anodines » (ou espiègle pour certains) que scientifiques et qui ont permis à mon séjour d'être très agréable. J'ai passé d'excellents moments avec eux ! J'ai grandement apprécié les moments passés avec Madame Mélanie Coureau (qu'ils soient administratifs ou plus anodins), ainsi qu'avec le personnel de l'ASGA à savoir Mesdames Nicole Galloy, Armelle Faynot et Elisabeth Mouillié. Je garde une pensée particulière pour Madame Françoise Homand, du temps où elle enseignait encore, et Monsieur Richard Giot qui m'ont donné goût à la géomécanique et qui m'ont confortée dans mon choix de poursuivre dans cette voie.

Cependant, il m'aurait été on ne peut plus difficile de réaliser cette thèse sans support expérimental (et les déboires qui vont avec ! Le moral peut en prendre un coup !). Les résultats présents dans cette thèse n'auraient pu être obtenus sans leur aide précieuse ! Un immense merci aux techniciens du laboratoire pour leur soutien autant technique que moral ! Merci de m'avoir fait l'honneur d'assister à ma soutenance (wahou !!). Un grand merci à Patrick Gaire pour son expertise technique et ses doigts de fée, à Mohammed Moumni (Momo) pour son aide et sa disponibilité sur les presses, Eric Lefèvre pour son humour (douteux ? ha ha !!), son aide et ses talents de bricoleur et Lise Salsi pour sa sympathie lors des séances de MEB. Mais celui qui a touché à tous les essais sur la craie (La craie n'a presque plus de secrets pour lui maintenant !!), les campagnes de prélèvement *in situ*, et qui au fur et à mesure est devenu un de mes piliers, c'est Laurent Schoumacker (*Walk like an Egyptian*). Les campagnes dans les carrières d'Estreux et de Château-Landon ont été plus que mémorables !!

Je remercie chaudement Messieurs François Pierret du Département Infrastructure chez INFRABEL et Luc Funcken de la Direction Générale des routes et Bâtiments du Service Public de Wallonie, pour leur aide et pour avoir permis l'exploitation des données mécaniques obtenues dans la carrière de la Malogne. Je remercie aussi le Conservatoire d'espaces naturels de Picardie et la Région Ile-de-France de nous avoir accordé l'accès aux carrières souterraines abritant des chiroptères (carrières de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon).

Mes remerciements vont également à Madame Farimah Masrouri du Lemta et Monsieur Jean-Marc Montel, directeur de l'École de Géologie, pour leur bienveillance tout au long de cette aventure. Je remercie également Océane Favreau et Luc de la Mensbrughe, élèves à l'École de Géologie maintenant envolés vers d'autres horizons, pour leur travail et les moments passés lors de leurs projets de laboratoire. Leur aide a été précieuse ! Une pensée également pour Madame Christine Fivet de l'ED RP2E pour sa bienveillance et sa sympathie mais également pour Madame Anne-Marie Leparmentier de l'IGC Paris pour m'avoir fait découvrir le monde passionnant des carrières souterraines.

Vient ensuite une partie un peu plus personnelle... Mais la vie de thésard ne se résume pas qu'à la recherche ! Je parle bien entendu des « coupains » qui ont contribué à l'aboutissement de cette quête, même si certains (beaucoup) ont déjà été nommés plus haut.

J'aimerais d'abord remercier les thésards et post-doctorants ayant fait un bout de chemin avec moi et qui m'ont envoyé pour une grande partie à l'autre bout du monde. Un pour tous, tous pour un ! Un immense merci à Feng Juan (ah... les soirées raviolis chinois...), Maxime (mon colocataire de 7 ans un peu boulet... ha ha), Lucille (un sourire à faire fuir la pensée la plus noire), Emerence (le cosplay est une force !), Clément et Audray (et leur tout petit qui arrive bientôt !! hi hi), ma chère Kamila (voilà... voilà...ha ha), Jabrane (c'est mon petit frère de thèse. Ah bon ?) et

Sarah, Arnaud (que je connais depuis un bout de temps), Luc (le cheval, c'est génial), Rasool (Ispahan n'a plus de secret pour moi maintenant), Maria (son accent chantant me manque beaucoup), Moïse (d'un calme olympien en toute circonstance), Bakri (et son discours sur le café), Rafid (patience is a virtue, my friend), Matthieu (exceptionnel partenaire de rock), Benjamin (et sa souris... euh... à la forme bizarre), Jamil (love is for the world to feel), Anh Tuan (la recette des nems vietnamiens ont rejoint mon livre de cuisine), Adeline (toujours de bonne humeur), Wadoud (les soirées bowlings restent un moment empli de rires), Hossein (Frozen), Samar (Cleopatra), Luyen (un battant), Emanuela (*Capri c'est fini*), Jannes (Dr Kinscher), Mohammed (toujours dans les nuages), Thomas (arrête de grandir !) ainsi que ceux que j'ai pu croiser au détour d'un couloir-réunion-barbecue-paintball-bowling mais que je n'ai pas eu le temps de connaître. Je terminerai ce paragraphe en ayant une pensée très particulière pour Mimi, notre « maman », devenue un pilier, pour avoir toujours été présente et avoir fait face à mes côtés lors de mes moments de doutes. Ils ont, tous, ma plus grande gratitude.

J'aimerais ensuite remercier mes amis qui n'ont eu de cesse de me soutenir lors de cette aventure et sans qui je me serai déjà écroulée depuis longtemps. Je pense surtout à mes « coupains » de l'École de Géologie mais aussi encore d'avant, à savoir Delphine, Khadija, Hélène, Solène, Florent, Simon, Séverine, Fred, Elizabeth, Delphin, Alexandre et beaucoup d'autres. Mais je pense surtout à Claire, Thibault et Annabelle pour leur courage, pour m'avoir supportée et encouragée. Un immense merci.

Avant d'en terminer, je tiens à remercier le plus chaleureusement possible ces personnes exceptionnelles que sont ma mère, mon père, mon frère, ma sœur, mon grand-père, ma grand-mère, ma grand-tante ainsi que les autres membres de ma famille (pensée particulière à ma grosse boule de poils) pour avoir été présents tout au long de cette aventure et pour m'avoir fait la joie d'assister à ma soutenance, que ce soit physiquement, virtuellement ou spirituellement. Vous avez ma plus profonde gratitude.

Je terminerai en ayant une pensée pour ma grand-maman du Québec, disparue pendant la quatrième année, et qui m'a toujours soutenue dans toutes mes entreprises.

Bien, suite à ce roman, cher lecteur, je vous souhaite une excellente lecture...

Et vive la craie !!

Résumé

Le risque d'instabilités d'ouvrages souterrains (naturels ou anthropiques) concerne plus de 10 000 communes en France. Les accidents ayant pour cause l'effondrement soudain de carrières souterraines sont parmi les plus destructeurs, aussi bien humainement que matériellement. L'évolution des possibles instabilités, dès lors que les enjeux sont importants, implique d'enrichir les connaissances actuelles afin de prévoir leur ampleur et leur impact en surface. Des travaux précédents ont démontré l'importance du couplage hydro-mécanique dans le diagnostic de stabilité. La complexité du phénomène d'interaction eau-craie est due à de nombreux facteurs environnementaux et la sensibilité à chacun de ces facteurs dépend entièrement de la craie considérée.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'influence de l'eau et de l'interaction eau-roche sur le comportement mécanique de trois craies dans le cadre d'une approche multi-échelles et multi-physiques.

L'étude des caractéristiques physiques et mécaniques de trois craies du Bassin Parisien, ainsi que leur rapport avec l'eau, a été réalisée. Les résultats obtenus à l'aide d'essais hydromécaniques à court terme restent cohérents avec la littérature.

Le « vieillissement » de la craie dans le cadre des carrières souterraines soumises à des fluctuations du niveau de la nappe a été prouvé et caractérisé. Il se traduit selon la craie, soit par un changement de la forme et la taille des cristaux dans la microstructure impliquant une amélioration des propriétés mécaniques en bord de pilier au détriment du cœur, soit par la présence de traces de dissolution dont la fréquence augmente dès que l'on s'éloigne du cœur, soit par une augmentation du nombre de microfissures en cœur amenant une diminution de ses propriétés.

L'étude du comportement différé de chaque craie a été faite à l'aide d'essais de fluage uniaxial à hygrométrie contrôlée avec ennoyage. Il a été établi entre autre que le fluage dépend de la minéralogie/microstructure et du couple déviateur-hygrométrie mais pas de l'histoire du chargement. Les mécanismes supposés être à l'origine des déformations différées sont d'ordre physico-mécanique et impliquent la rupture et le rétablissement de liaisons électro-statiques.

L'interprétation de tous les essais réalisés a permis de quantifier l'importance des contributions relatives des différents paramètres sur le comportement différé. Le but à long terme reste d'alimenter à la fois l'expertise et les modèles de calculs de sorte à pouvoir prédire notamment l'impact d'une variation du niveau des nappes sur la stabilité à long terme des carrières de craie. Un modèle rhéologique a en ce sens été développé au sein de l'INERIS (Souley et al. 2016).

Mots-clés : craie, carrières souterraines, expérimentation, eau, déformation, rupture, vieillissement, modélisation

Abstract

The risk of instability of underground structures (natural or anthropogenic) involves over 10 000 towns in France. The accidents due to the sudden collapse of underground quarries are among the most destructive, both humanly and materially. The evolution of possible instabilities, since the issues are significant, implies to enrich current knowledge to predict their extent and their impact on the surface. Previous work has demonstrated the importance of the hydro-mechanical coupling in the diagnosis of stability. The complexity of the chalk-water interaction phenomenon is due to many environmental factors and sensitivity to each factor depends entirely on the chalk considered.

The main objective of this thesis is to study the influence of water and water-rock interaction on the mechanical behaviour of three chalks as part of a multi-scale and multi-physics approach.

The study of physical and mechanical characteristics of chalks from three underground quarries situated in the Parisian Basin, and their interaction with water was carried out. The results obtained through short-term hydro-mechanical tests remain consistent with the literature.

The "ageing" of chalk from the underground quarries subjected to fluctuations in the water table has been proven and characterized. It is expressed, based on the chalk considered, by a change in the shape and size of crystals in the microstructure involving improved mechanical properties at the edge of the pillar to the detriment of the heart, or by the presence of traces of dissolution whose frequency increases as one moves from the heart, or by increasing the number of microcracks in the heart causing a decrease in the properties of the chalk.

The study of the long-term behaviour of each chalk was developed through uniaxial creep tests with controlled humidity and waterlogging. It was established among other things that creep depends on the mineralogy / microstructure and the deviatoric stress-humidity couple but not on the loading history. The mechanisms believed to be the origin of creep deformations are of a physico-mechanical nature and involve the breaking and the restoring of electrostatic bonds between grains.

The interpretation of all the tests carried out allowed to quantify the importance of the relative contributions of various parameters on the long-term behaviour. The long-term goal remains to power both the expertise and the model calculations so that one can predict the impact of a particular variation of the groundwater level on the long-term stability of chalk underground quarries. A rheological model has been developed in this direction within the INERIS (Souley et al. 2016).

Keywords: chalk, underground quarries, experiment, water, strain, failure, ageing, modelling

Table des matières

Remerciements	iv
Résumé	viii
Abstract	ix
Table des matières	x
Liste des annexes.....	xv
Liste des illustrations	xv
Liste des tableaux.....	xxiv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I.....	7
Généralités sur l'aspect phénoménologique de la craie	
I.1. Introduction.....	9
I.2. Définition et caractérisation geologique de la craie	10
I.2.1. Définition	10
I.2.2. Sédimentologie.....	11
I.2.2.1. Pétrographie.....	11
I.2.2.1.1. Faune et flore.....	11
I.2.2.1.2. Minéralogie	12
I.2.2.1.3. Microstructure	14
I.2.2.2. Importance de l'environnement de dépôt et de l'histoire géologique.....	16
I.3. Propriétés physiques	16
I.3.1. Porosités et masses volumiques.....	16
I.3.2. Interaction eau-craie.....	20
I.3.2.1. Phénomènes de capillarité dans les craies	20
I.3.2.2. Interactions physico-chimiques	23
I.3.2.3. Phénomènes de dissolution-recristallisation	25
I.4. Phénoménologie du comportement mécanique	25
I.4.1. Généralités sur le comportement à court terme des craies	26

I.4.1.1. Chargement hydrostatique	26
I.4.1.2. Chargement déviatorique et traction	28
I.4.2. Comportement différé.....	31
I.5. Vieillessement.....	33
I.5.1. Avant-propos	33
I.5.2. Notion d'altération	33
I.5.2.1. Définition	33
I.5.2.2. Facteurs et manifestations dans le cas de la craie.....	34
I.5.3. Type de désordres dans les carrières souterraines de craie	35
I.5.3.1. Types d'exploitation	35
I.5.3.2. Type de dégradation	36
I.5.4. Quid du vieillissement de la craie ?	36
I.6. Conclusion.....	38
CHAPITRE II.....	41
	Présentation des carrières étudiées
II.1. Introduction.....	43
II.2. Carrière d'Estreux.....	44
II.2.1. Données géographiques et contexte historique	44
II.2.2. Contexte géologique et hydrologique	45
II.2.3. Mode d'exploitation et désordres.....	46
II.3. Carrière de Saint-Martin-le-Noëud	48
II.3.1. Données géographiques et contexte historique	48
II.3.2. Contexte géologique et hydrologique	49
II.3.3. Mode d'exploitation et désordres.....	51
II.4. Carrière de Château-Landon	52
II.4.1. Données géographiques et contexte historique	52
II.4.2. Contexte géologique et hydrologique	53
II.4.3. Mode d'exploitation et désordres.....	54
II.5. Conclusion.....	56

CHAPITRE III	57
Étude des propriétés physico-mécaniques des craies	
III.1. Introduction	59
III.2. Indications générales sur l'échantillonnage	60
III.3. Etude des propriétés physiques des craies	61
III.3.1. Dispositifs et protocoles expérimentaux	61
III.3.1.1. Masses volumiques et pétrographie.....	61
III.3.1.2. Mesure des vitesses d'onde de compression et de cisaillement.....	62
III.3.1.3. Propriétés du milieu poreux	63
III.3.1.3.1. Perméabilités intrinsèques	63
III.3.1.3.2. Porosité matricielle.....	65
III.3.1.4. Isothermes de sorption.....	65
III.3.1.4.1. Notion de pression capillaire ou succion.....	65
III.3.1.4.2. Méthode gravimétrique (utilisation de solutions salines saturées) ..	67
III.3.1.4.3. Méthode manométrique ou dynamique (utilisation de l'adsorbimètre)	67
III.3.2. Résultats et interprétation.....	69
III.3.2.1. Masse volumique, pétrographie, vitesses d'onde et structure.....	69
III.3.2.2. Propriétés du milieu poreux	74
III.3.2.3. Isothermes de sorption.....	77
III.4. Etude du comportement mécanique à court terme des craies en conditions saturées et partiellement saturées.....	81
III.4.1. Dispositifs et protocoles expérimentaux	81
III.4.1.1. Instrumentation des échantillons.....	81
III.4.1.2. Essais de compression uniaxiale	82
III.4.1.3. Essais de compression triaxiale	84
III.4.1.4. Essais de compression isotrope.....	84
III.4.1.5. Essais de traction indirecte	84
III.4.2. Résultats et interprétations.....	85
III.4.2.1. Synthèse des résultats pour les essais de compressions uniaxiale et triaxiale et de traction.....	85
III.4.2.1.1. Essais de compression uniaxiale	85
III.4.2.1.2. Essais de compression triaxiale.....	93

III.4.2.1.3. Tractions	101
III.4.2.2. Critères de rupture	102
III.4.2.3. Essais de compression isotrope.....	109
III.4.3. Discussion	111
III.5. Conclusion	115
CHAPITRE IV.....	117
Étude du « vieillissement » des craies à l'échelle du pilier	
IV.1. Introduction	119
IV.2. Matériel et méthodes.....	120
IV.2.1. Méthode de prélèvement et de préparation des échantillons.....	120
IV.2.2. Observations des échantillons au Microscope Électronique à Balayage (MEB)	121
IV.2.3. Propriétés physiques	121
IV.2.4. Propriétés mécaniques	121
IV.2.5. Étude de la fracturation au sein du pilier	122
IV.3. Résultats	123
IV.3.1. Craie de Saint-Martin-le-Noëud	123
IV.3.1.1 Observations au MEB	123
IV.3.1.2 Propriétés physiques et mécaniques	124
IV.3.1.3 Fracturation du pilier	127
IV.3.2. Craie d'Estreux	128
IV.3.2.1 Observations au MEB	128
IV.3.2.2 Propriétés physiques et mécaniques	128
IV.3.2.3 Fracturation du pilier	131
IV.3.3. Craie de Château-Landon.....	132
IV.3.3.1 Observations au MEB	132
IV.3.3.2 Propriétés physiques et mécaniques	132
IV.3.3.3 Étude de la fracturation.....	134
IV.4. Interprétation et discussion	135
IV.4.1. Néomorphisme d'aggradation ou Ostwald Ripening (Ostwald 1897).....	137

IV.4.2. Évolution dans un milieu oxydant prédisposant à une recristallisation.....	138
IV.4.3. Drainage vertical du pilier.....	139
IV.5. Conclusion	140

CHAPITRE V..... 143

Influence de l'hygrométrie sur le comportement à long terme des craies

V.1. Introduction	145
V.2. Dispositifs et protocoles expérimentaux.....	146
V.2.1. Préparation des échantillons.....	146
V.2.2. Essais de fluage uniaxiaux multipaliers	146
V.2.2.1. Série en condition sèche	146
V.2.2.2. Série à hygrométrie contrôlée.....	148
V.2.2.3. Cas particulier de la craie « pure »	150
V.3. Résultats	152
V.3.1. Craie dolomitique de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud	152
V.3.1.1. Série en condition sèche	152
V.3.1.2. Série à hygrométrie contrôlée.....	155
V.3.2. Craie glauconieuse de la carrière d'Estreux.....	159
V.3.2.1. Série en condition sèche	159
V.3.2.2. Série à hygrométrie contrôlée.....	163
V.3.3. Craie de la carrière de Château-Landon.....	167
V.3.3.1. Difficultés expérimentales	167
V.3.3.2. Série en condition sèche	168
V.3.3.3. Série à hygrométrie contrôlée.....	169
V.4. Données <i>in situ</i>	171
V.4.1. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	171
V.4.2. Craie d'Estreux	174
V.4.3. Craie de Château-Landon.....	175
V.5. Interprétation et discussion	176
V.6. Conclusion	178

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	181
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	191
ANNEXES	211

Liste des annexes

<i>Annexe</i>	<i>Titre</i>	<i>Pages</i>
Annexe A	Analyse des propriétés trouvées dans la bibliographie	17
Annexe B	Courbes d'essais et résultats – Propriétés physiques et mécaniques CT	42
Annexe C	Courbes d'essais et résultats – Propriétés mécaniques LT	11
Annexe D	Vers la modélisation du comportement mécanique des craies étudiées	17

Liste des illustrations

CHAPITRE I

Figure I.1 : Galerie de la carrière de craie de Montalets à Meudon (Crédit : urban-exploration)	9
Figure I.2 : Diagramme ternaire craie – argiles – calcarénites (Schroeder 2002, adapté de Mortimore 1989).....	10
Figure I.3 : Coccosphères et coccolithes. (a) Coccosphère actuelle et coccolithes de l'espèce <i>Emiliana huxleyi</i> (Crédit : Centre des Pêches de l'Atlantique Nord-Ouest, Canada). (b) Coccosphère fossilisée (diamètre de +/- 30 μm) dans la craie Campanienne de Lixhe (Schroeder 2002).....	11

Figure I.4 : Teneur en carbonates de calcium suivant l'âge géologique de diverses craies (données issues du Tableau I.2)	12
Figure I.5 : Pourcentage de silice suivant l'âge géologique de diverses craies (données issues du Tableau I.2).....	14
Figure I.6 : Ponts de calcite. (a) Schroeder 2002 d'après Mata 2001, (b) Hjuler et Fabricius 2009. C : ciment de contact	15
Figure I.7 : Images des nanoparticules d'argiles (feuilletés indiqués par les flèches) sur des grains de calcite. Craie de Mer du Nord. (Skovbjerg et al. 2012).....	15
Figure I.8 : Diagramme de résolution de différentes méthodes de caractérisation de la porosité suivant le diamètre des rayons de pores	17
Figure I.9 : Masse volumique sèche de diverses craies suivant l'âge géologique (données issues du Tableau I.2).....	17
Figure I.10 : Porosité matricielle de diverses craies suivant l'âge géologique (données issues du Tableau I.2).....	19
Figure I.11 : Perméabilité intrinsèque de diverses craies suivant l'âge géologique (voir Tableau I.2).....	20
Figure I.12 : Vitesse des ondes P mesurées sur la craie de Lixhe en fonction du degré de saturation (Broux 2010)	21
Figure I.13 : Diagramme pression capillaire (suction) vs degré de saturation de la craie de Lixhe (eau-huile) (Schroeder et al. 2003).....	22
Figure I.14 : Isothermes de sorption (ici 20°C) de diverses craies de Mer du Nord obtenus à l'aide d'un adsorbimètre (Okhrimenko et al. 2014).....	22
Figure I.15 : Les différents types d'isothermes de sorption suivant la classification BDDT de Brunauer et al. 1940 et délimitation des trois zones du type II	23
Figure I.16 : Surface spécifique de diverses craies suivant l'âge géologique (données issues du Tableau I.2).....	24
Figure I.17 : Modèle conceptuel des liaisons inter-particulaires pour une craie de Mer du Nord (Schroeder 2002, Bois 2000, Risnes et Flaageng 1999).....	24
Figure I.18 : Essai de compression isotrope sur la craie de Lixhe saturée au Soltrol (Schroeder 2002)	26
Figure I.19 : Résultats d'essais œdométriques sur différentes craies en fonction de la porosité et la teneur en silice (Monjoie et al. 1990).....	28
Figure I.20 : Courbes contrainte-déformations résultant d'essais triaxiaux avec différents confinements sur des échantillons de craie de Lixhe (Schroeder 2002)	29

Figure I.21 : Résistance en compression uniaxiale de diverses craies suivant l'âge géologique (voir Tableau I.2)	30
Figure I.22 : Module de Young de diverses craies suivant l'âge géologique (voir Tableau I.2).....	30
Figure I.23 : Évolution des modules de Young E et de compressibilité K en fonction des conditions expérimentales d'un essai de fluage triaxial (σ_3 : confinement) ou hydrostatique (Maranini et Brignoli 1999).....	32
Figure I.24 : Photographies de deux types de désordre : (a) vue d'un fontis (carrière de Saint-Martin-le-Nœud, France) ; (b) vue au sein de la carrière d'un effondrement généralisé (carrière de la Malogne, Belgique).....	36

CHAPITRE II

Figure II.1 : Localisation des trois carrières dans le contexte géologique global du Bassin Parisien (crédit : GéoPortail)	43
Figure II.2 : (a) Localisation (Crédit : GéoPortail) et (b) coupe stratigraphique des terrains de la carrière d'Estreux (Nguyen 2009, Raffoux et Ervel 1980)	45
Figure II.3 : Évolution du niveau d'ennoyage de la carrière d'Estreux (Gombert 2014)	46
Figure II.4 : Plan d'exploitation de la carrière d'Estreux (Crédit : INERIS). Zone de prélèvement indiquée par un rond noir.....	47
Figure II.5 : Vues sur les galeries et piliers de la carrière d'Estreux (Crédit : Vincent DUSEIGNE - http://tchorski.morkitu.org)	48
Figure II.6 : Localisation de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (Crédit : GéoPortail)	49
Figure II.7: Colonne stratigraphique des principaux affleurements depuis la base du Crétacé Supérieur dans le Pays de Bray (Crédit : BRGM).....	50
Figure II.8 : Schéma hydrogéologique de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (Barhoum 2014)	50
Figure II.9 : Plan de la carrière souterraine de Saint-Martin-le-Nœud (Crédit : INERIS). Zone de prélèvement indiquée par un rond noir.....	51
Figure II.10 : Vues sur les galeries et piliers de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (Crédit : INERIS).....	52
Figure II.11 : Localisation de la carrière de Château-Landon (Crédit : GéoPortail) ..	52
Figure II.12: Coupe stratigraphique d'axe NW-SE passant par le Loing (Gombert et Cherkaoui 2011)	54

Figure II.13 : Vues des galeries de la carrière de Château-Landon (Crédit : INERIS)	55
Figure II.14 : Plan de la carrière de Château-Landon (Crédit : CG77). Zone de prélèvement indiquée par un rond noir.....	55

CHAPITRE III

Figure III.1 : Dispositif expérimental de mesure de la perméabilité : (a) au gaz (Perméamètre de type IFP d'après Homand et al. 2000) et (b) à l'eau (Utilisation d'une cellule de compression triaxiale d'après procédure GeoRessources MR3-03)	64
Figure III.2 : Diagramme de résolution de différentes méthodes de caractérisation de la porosité suivant le diamètre des rayons de pores	65
Figure III.3 : Analyses microscopiques des trois craies obtenues à l'aide de lames minces. Clichés en lumière polarisée analysée et non-analysée	71
Figure III.4 : Place des trois craies dans le diagramme ternaire Calcite - Calcarénite - Argile et composition minéralogique	72
Figure III.5 : Confrontation des trois craies avec les données de la littérature.....	74
Figure III.6 : Porosités, perméabilités et diagramme des rayons de pores en 1 ^{ère} et 2 ^{ème} injection pour les craies d'Estreux (rouge), de Saint-Martin-le-Nœud (bleu) et de Château-Landon (vert)	75
Figure III.7 : Confrontation des trois craies avec les données de la littérature.....	76
Figure III.8 : Différentes régions d'une isotherme de sorption (Baillon et Loubignac 2007)	78
Figure III.9 : Isothermes de sorption (a) obtenues par adsorbmètre et (b) confrontation avec les solutions salines et la porosimétrie au mercure. Craie d'Estreux	78
Figure III.10 : Isothermes de sorption (a) obtenues par adsorbmètre et (b) confrontation avec les solutions salines et la porosimétrie au mercure. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	80
Figure III.11 : Isothermes de sorption (a) obtenues par adsorbmètre et (b) confrontation avec la porosimétrie au mercure. Craie de Château-Landon..	80
Figure III.12 : Les différents seuils dans le comportement de la craie (diagramme contrainte déformation)	83
Figure III.13 : Diagramme contrainte-déplacement en fonction de l'hygrométrie. Essais de compression uniaxiale. Craies (a) d'Estreux et (b) de Saint-Martin-le-Nœud	85

Figure III.14 : Exemples de courbes contrainte-déformation de trois essais de compression uniaxiale en fonction de l'hygrométrie. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	88
Figure III.15 : Rapports E_{i+1}/E_i et v_{i+1}/v_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=0$ MPa) pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud .	89
Figure III.16 : Photographies d'échantillons après essai de compression uniaxiale en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Echantillons placés initialement à des hygrométries respectives de 36 %, 90 % et 100 %. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	89
Figure III.17 : Exemples de courbes contrainte-déformation de trois essais de compression uniaxiale en fonction de l'hygrométrie. Craie d'Estreux	90
Figure III.18 : Rapports E_{i+1}/E_i et v_{i+1}/v_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=0$ MPa) pour la craie d'Estreux	90
Figure III.19 : Photographies d'échantillons après essai de compression uniaxiale en fonction de l'état hydrique et formes de rupture. Échantillons placés initialement à des hygrométries respectives de 36 %, 90 %, 95 % et 100 %. Craie d'Estreux.	91
Figure III.20 : Exemples de courbes contrainte-déformation de deux essais de compression uniaxiale dans les états sec et saturé. Craie de Château-Landon	93
Figure III.21 : Photographies d'échantillons après essai de compression simple, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie de Château-Landon	93
Figure III.22 : Exemples de courbes contrainte-déformation de six essais de compression triaxiale en fonction de l'hygrométrie. 1 MPa et 3 MPa de confinement. Craie de Saint-Martin-le-Nœud.....	96
Figure III.23 : Rapports E_{i+1}/E_i et v_{i+1}/v_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=1$ et 3 MPa) pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud	97
Figure III.24 : Photographies d'échantillons après essai de compression triaxiale, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	98
Figure III.25 : Exemples de courbes contrainte-déformation de six essais de compression triaxiale en fonction de l'hygrométrie. 1 MPa et 3 MPa de confinement. Craie d'Estreux	99
Figure III.26 : Rapports E_{i+1}/E_i et v_{i+1}/v_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=1$ et 3 MPa) pour la craie d'Estreux	99
Figure III.27 : Photographies d'échantillons après essai de compression triaxiale, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie d'Estreux.....	100

Figure III.28 : Exemples de courbes contrainte-déformation de deux essais de compression triaxiale en fonction de l'hygrométrie. 1 MPa et 3 MPa de confinement. Craie de Château-Landon	101
Figure III.29 : Photographies d'échantillons après essai de compression triaxiale, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie de Château-Landon ...	101
Figure III.30 : Influence de l'hygrométrie et du confinement sur la résistance en compression. Résistance au pic dans le plan déviateur-confinement. Craies (a) d'Estreux et (b) de Saint-Martin-le-Nœud.....	102
Figure III.31 : Critères de rupture pour la résistance au pic σ_c de la craie d'Estreux dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q).....	103
Figure III.32 : Critères pour le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie d'Estreux dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q).....	104
Figure III.33 : Critère de Hoek&Brown pour la résistance au pic de la craie d'Estreux	104
Figure III.34 : Critères de rupture pour la résistance au pic de la craie de Saint-Martin-le-Nœud dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q).....	105
Figure III.35 : Critères pour le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie de Saint-Martin-le-Nœud dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q).....	105
Figure III.36 : Critère de Hoek&Brown pour la résistance au pic de la craie de Saint-Martin-le-Nœud.....	106
Figure III.37 : Critères de rupture pour la résistance au pic de la craie de Château-Landon dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q). Etat sec (rouge) et état saturé (bleu).....	107
Figure III.38 : Critères pour le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie de Château-Landon dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q). Etat sec (rouge) et état saturé (bleu).....	107
Figure III.39 : Critère de Hoek&Brown pour la résistance au pic de la craie de Château-Landon (a) état sec (b) état saturé	107
Figure III.40 : Paramètres des critères de rupture de Mohr-Coulomb et de Drucker-Prager pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud en fonction du degré de saturation	108
Figure III.41 : Paramètres des critères de rupture de Hoek & Brown pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud en fonction du degré de saturation.....	109

Figure III.42 : Courbes contrainte-déformation de plusieurs essais de compression isotrope et paramètres associés (K : coefficient de compressibilité ; P_{col} : seuil de « pore collapse » ; P_t : seuil de raidissement ; K' : nouveau coefficient de compressibilité ; n_f : porosité de fissure).	110
Figure III.43 : Confrontation des trois craies avec les données de la littérature. Cas de la résistance en compression – Âges géologiques des craies de faibles profondeurs : Miocène (orange), Maastrichtien (rose), Campanien (violet), Santonien (bleu), Turonien (vert) – Craies de grande profondeur (rouge)	112
Figure III.44 : Variation du ratio R_c/R_{csec} en fonction du degré de saturation en parallèle de résultats pour d'autres roches sédimentaires (d'après Watelet 1996)	113

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Localisation des divers sondages carottés réalisés dans le pilier de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (les carottes proviennent du sondage SC3)	120
Figure IV.2 : Dispositif expérimental pour les essais de mini-compression uniaxiale. Utilisation du micro-indenteur	122
Figure IV.3 : Photographies MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	123
Figure IV.4 : Impact du vieillissement/endommagement sur les masses volumiques ρ (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	124
Figure IV.5 : Impact du vieillissement/endommagement sur la vitesse V_p des ondes de compression P (échantillons saturés), la teneur en eau w et la porosité accessible à l'eau n en fonction de la profondeur. Synthèse des deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	124
Figure IV.6 : Impact du vieillissement/endommagement sur les porosités totale, libre et piégée mesurées au porosimètre à mercure en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	125
Figure IV.7 : Impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression uniaxiale (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	126
Figure IV.8 : Impact du vieillissement/endommagement sur le module de Young E dans les cas (a) sec et (b) saturé en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	126

Figure IV.9 : Espacement des fractures verticales en fonction de la profondeur au sein du pilier de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Les sondages ont été remplacés le long de la hauteur de galerie (du mur au toit)	127
Figure IV.10 : Photographies MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier. Craie d'Estreux	128
Figure IV.11 : Impact du vieillissement/endommagement sur les masses volumiques (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie d'Estreux	128
Figure IV.12 : Impact du vieillissement/endommagement sur la vitesse V_p des ondes de compression P (échantillons saturés), la teneur en eau w et la porosité accessible à l'eau n en fonction de la profondeur. Synthèse des deux sondages. Craie d'Estreux	129
Figure IV.13 : Impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression sèche et saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie d'Estreux	130
Figure IV.14 : Impact du vieillissement/endommagement sur le module de Young E dans les cas (a) sec et (b) saturé en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie d'Estreux	130
Figure IV.15 : Impact du vieillissement/endommagement sur le seuil de dilatance σ_D (échantillons saturés) et sur les valeurs de contrainte résiduelle σ_R (comportement post-pic) en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie d'Estreux	130
Figure IV.16 : Espacement des fractures verticales en fonction de la profondeur au sein du pilier de la carrière d'Estreux. Les sondages ont été remplacés le long de la hauteur de galerie (du mur au toit)	131
Figure IV.17 : Photographies MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier. Craie de Château-Landon.....	132
Figure IV.18 : Impact du vieillissement/endommagement sur les masses volumiques (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Craie de Château-Landon	132
Figure IV.19 : Impact du vieillissement/endommagement sur la vitesse V_p des ondes de compression P et la masse volumique des grains ρ_s en fonction de la profondeur. Craie de Château-Landon.....	133
Figure IV.20 : Impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression uniaxiale R_c et les modules de Young E en fonction de la profondeur. Craie de Château-Landon.....	133
Figure IV.21 : Espacement des fractures verticales en fonction de la profondeur au sein du pilier de la carrière de Château-Landon	134

Figure IV.22 : Évolution de la résistance en compression uniaxiale en fonction de la profondeur dans un pilier de la carrière de Mons en Belgique (Funcken et Welter 1996)..... 136

CHAPITRE V

Figure V.1 : Dispositif expérimental de la série à hygrométrie contrôlée 148

Figure V.2 : Schéma de disposition des jauges et colliers LVDT sur les échantillons de la craie de Château-Landon destinés aux essais de fluage en compression simple (a) vue de côté (b) vue du dessus 151

Figure V.3 : Courbes de fluage d'un échantillon sec (SMb1) de craie prélevé dans la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Déformations différées axiales ε_{ax}^{vp} , latérales ε_{lat}^{vp} , volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ 153

Figure V.4 : Photographie des échantillons de fluage après essai montrant la forme des ruptures. Série en condition sèche. Craie de Saint-Martin-le-Nœud 154

Figure V.5 : Courbes de fluage des échantillons de craie partiellement saturés prélevés dans la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées 156

Figure V.6 : Courbes de fluage des échantillons partiellement saturés de craie de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Déformations volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées..... 157

Figure V.7 : Déformations différées volumique ε_v^{vp} vs déviatorique $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie de Saint-Martin-le-Nœud. Série à hygrométrie contrôlée..... 157

Figure V.8 : Courbes de fluage des trois échantillons secs de craie de la carrière d'Estreux. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées 160

Figure V.9 : Courbes de fluage des trois échantillons secs de craie de la carrière d'Estreux. Déformations volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées..... 161

Figure V.10 : Déformations différées volumique ε_v^{vp} vs déviatorique $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie d'Estreux. Série en condition sèche 161

Figure V.11 : Photographies des échantillons de fluage après essai montrant les formes de rupture. Série en condition sèche. Craie d'Estreux 162

Figure V.12 : Courbes de fluage des échantillons partiellement saturés de craie de la carrière d'Estreux. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées 164

Figure V.13 : Courbes de fluage des échantillons partiellement saturés de craie de la carrière d'Estreux. Déformations volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées	165
Figure V.14 : Déformations différées volumique ε_v^{vp} vs déviatorique $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie d'Estreux. Série à hygrométrie contrôlée	165
Figure V.15 : Courbes de fluage sur échantillon sec CH6-F de craie de la carrière de Château-Landon. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées	168
Figure V.16 : Courbes de fluage de l'échantillon CH1-F partiellement saturé (Hr=85 %) de craie de la carrière de Château-Landon. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} , latérales ε_{lat}^{vp} , volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées	170
Figure V.17 : Déformations différées volumiques ε_v^{vp} vs déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie de Château-Landon. Échantillon CH1-F initialement soumis à Hr=85 %	170
Figure V.18 : Évolution comparée de la déformation verticale du pilier n°1 sur deux faces non parallèles (SFX01 et SFX02) (Gombert 2014)	172
Figure V.19 : Évolution comparée de la déformation horizontale du pilier n°1 à deux profondeurs dans le pilier (MDX-01 à 1 m ; MDX-02 à 0.50 m) (Gombert 2014)	173
Figure V.20 : Évolution de la teneur en eau dans le pilier à différentes hauteurs et profondeurs en parallèle de l'ennoyage du pilier et de la percolation au toit (Gombert 2014)	173
Figure V.21 : Fluctuation des paramètres mesurés sur le pilier de la carrière d'Estreux et du niveau de la nappe (Gombert 2014)	175
Figure V.22 : Variations de convergence et niveau de la nappe à Estreux (Gombert 2014)	175

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Masse volumique et déformabilité d'un cristal de calcite et d'autres composants de la craie (d'après Ahrens 1995 et Nye 1985)	13
Tableau I.2 : Synthèse de données bibliographiques sur la craie	18

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Comparaison des sites expérimentaux (d'après Gombert 2014).....	56
--	----

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Paramètres d'essai pour la détermination des isothermes de sorption par l'utilisation d'un adsorbmètre	68
Tableau III.2 : Données physiques des craies. Mesures et calculs effectués pour 20 échantillons de chaque craie.....	70
Tableau III.3 : Valeurs des vitesses des ondes de compression P et de cisaillement S avec valeurs du module de déformabilité et du coefficient de Poisson dynamiques. Mesures et calculs effectués sur 10 échantillons de chaque craie	73
Tableau III.4 : Données d'essais et physiques des échantillons utilisés pour la détermination des isothermes de sorption par la méthode de l'adsorbmètre. Les valeurs entre crochets et en italique ont respectivement été obtenues à partir des courbes de sorption et de désorption	77
Tableau III.5 : Caractéristiques mécaniques des craies de Saint-Martin-le-Noëud et d'Estreux en fonction de l'hygrométrie. Compressions uniaxiales	87
Tableau III.6 : Caractéristiques mécaniques de la craie de Château-Landon. Compressions uniaxiales et triaxiales. Etats sec et saturé.....	92
Tableau III.7 : Caractéristiques mécaniques des craies de Saint-Martin-le-Noëud et d'Estreux en fonction de l'hygrométrie. Compressions triaxiales à 1 MPa de confinement	94
Tableau III.8 : Caractéristiques mécaniques des craies de Saint-Martin-le-Noëud et d'Estreux en fonction de l'hygrométrie. Compressions triaxiales à 3 MPa de confinement	95
Tableau III.9 : Valeurs des résistances en traction (en MPa) pour les craies d'Estreux, de Saint-Martin-le-Noëud et de Château-Landon	102
Tableau III.10 : Critères de rupture pour la craie de Château-Landon dans les états sec et saturé	109
Tableau III.11 : Comparaison des valeurs des modules d'élasticité isostatique dynamiques, déviatoriques et hydrostatiques	114

CHAPITRE V

Tableau V.1 : Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier. Série en condition « sèche ». Craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud.....	147
Tableau V.2 : Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier. Série à hygrométrie contrôlée. Craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud.....	149
Tableau V.3 : Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier. Craie de Château-Landon	152
Tableau V.4 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série en conditions sèches. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	154
Tableau V.5 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculées à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie de Saint-Martin-le-Nœud	155
Tableau V.6 : Vitesses moyennes de fluage axiales V_{fax} et latérales V_{flat} pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie de Saint-Martin-le-Nœud.....	158
Tableau V.7 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série en conditions sèches. Craie d'Estreux	159
Tableau V.8 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie d'Estreux	163
Tableau V.9 : Vitesses de fluage pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie d'Estreux.....	166
Tableau V.10 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série en conditions sèches. Craie de Château-Landon.....	168
Tableau V.11 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculées à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie de Château-Landon..	169

Introduction générale

La présente thèse livre une contribution majoritairement expérimentale à l'étude de la craie et a pour sujet l'étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie. Elle est le fruit d'une collaboration entre la Direction des Risques du Sol et du sous-sol (DRS) de l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS) et l'équipe Hydro-Géomécanique Multi-échelles (HGM) du laboratoire GeoRessources rattaché à l'École Nationale Supérieure de Géologie (ENSG), elle-même dépendant de l'Université de Lorraine.

Contexte et cadre général



Effondrement de Clamart (1961)



Effondrement de la carrière de la Malogne près de Mons en Belgique (2015)

La craie est utilisée depuis des siècles dans le Bassin Parisien comme matériau de construction (pierre à chaux ou pierre à bâtir) et de sculpture en raison respectivement de son abondance et de la facilité à la travailler. Elle fût notamment le matériau de prédilection pour la construction de monuments historiques tels la Citadelle de Lille ou la cathédrale de Beauvais. La plupart des exploitations de craie ont été exploitées selon la méthode des chambres et piliers.

Le risque d'instabilités d'ouvrages souterrains (naturels ou anthropiques) concerne plus de 10 000 communes en France. Il peut être lié à une diminution de la résistance de la craie (d'origine naturelle ou anthropique) et/ou à une modification des sollicitations auxquelles ces exploitations sont soumises (extension des carrières, construction en surface, remontée du niveau des nappes...).

Les accidents ayant pour cause l'effondrement soudain de carrières souterraines sont parmi les plus destructeurs. Citons notamment les effondrements de Clamart¹ de 1961 et de la carrière de Mons² (Belgique) en avril 2015. L'évolution possible des instabilités, dès lors que les enjeux sont importants, implique de faire des études afin de prévoir leur ampleur et leur impact en surface.

Objectifs

La thèse s'inscrit à l'INERIS dans le cadre de l'axe CORDIS « COMpréhension des processus couplés conduisant à la Rupture ou à la DISsolution des roches », anciennement COSMOS « COMpréhensIon, MODélisation et Surveillance de la déformation et de la rupture des massifs rocheux », depuis janvier 2015. L'objectif principal est d'étudier l'influence de l'eau et de l'interaction eau-roche sur le comportement mécanique à court et long terme des carrières souterraines de craie du Bassin Parisien.

Des travaux précédents ont démontré l'importance du couplage hydro-mécanique dans le diagnostic de stabilité. La complexité du phénomène d'interaction eau-craie est due à de nombreux facteurs : la faible cohésion, la sensibilité aux fortes pressions, les déformations et rupture différées (fluage), la porosité, la succion, la fatigue due aux cycles humidification/séchage (interaction eau-roche), les compositions minéralogique des craies et chimique des fluides saturants, et l'effondrement plastique des pores (« pore collapse »). A l'échelle du micromètre, la capillarité, les forces électrostatiques, les contacts entre les cristaux évoluent lorsque la craie est soumise à des sollicitations d'ordre mécanique, chimique, etc. Tous ces phénomènes font partie intégrante de l'interaction eau-craie et le poids de l'un ou l'autre de ces phénomènes varie en fonction de la craie considérée. Beaucoup d'auteurs ont tenté d'expliquer cette interaction sans parvenir à l'explicitier de manière certaine.

Démarche scientifique

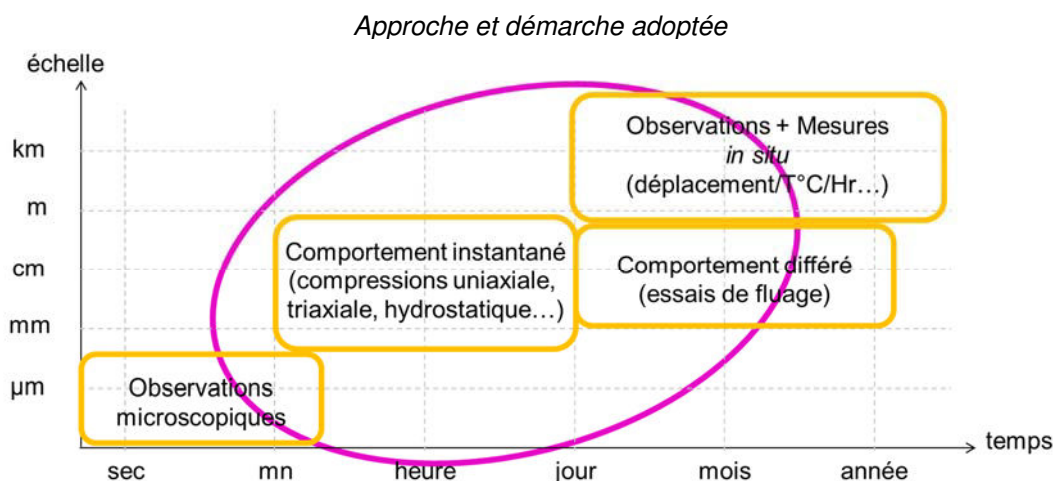
Au regard de certaines lacunes de la littérature, le programme de recherche s'articule autour de quatre grands axes :

- une revue de l'état de l'art ;
- un choix de sites expérimentaux couvrant les différents types de craie ;
- une mise en œuvre de moyens expérimentaux pour une caractérisation de ces craies ;
- une conceptualisation des phénomènes à partir des résultats expérimentaux dans le but de développer un modèle prédictif.

¹ Cet effondrement brutal de 6 hectares sur une hauteur de 2 à 4 m sous les communes de Clamart et d'Issy-les-Moulineaux en date du 01/06/1961 a fait 21 morts, 45 blessés, plus de 273 sinistrés, 6 rues disparues et 23 immeubles détruits (Cf. *L'Humanité* 1961).

² Celui-ci date du 22/04/2015 et est d'une surface de 1 à 2 ha. Il est survenu à proximité d'une ligne de chemin de fer.

Pour continuer dans cette démarche, ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre d'une approche multi-échelles et multi-physiques, même si nous ne nous sommes limités qu'aux échelles intermédiaires (rond magenta sur le diagramme ci-dessous). Le principe est de toujours faire le lien entre les différents phénomènes physiques prenant place dans la craie de la plus petite à la plus grande échelle, qu'elle soit spatiale ou temporelle.



Organisation du mémoire

Le présent mémoire, en dehors de la présente introduction et de la conclusion générale, est constitué de cinq chapitres décrits ci-après.

Le Chapitre I a pour but d'exposer la phénoménologie du comportement de la craie en fonction de ses caractéristiques physiques et mécaniques, et du contexte dans lequel elle évolue. Il est structuré en quatre parties. La première partie concerne la genèse, la composition minéralogique et la pétrographie de la craie, la deuxième et la troisième synthétisent les données disponibles dans la littérature et relatives aux propriétés physiques et mécaniques en insistant sur les interactions eau/craie. Enfin la dernière se focalise sur la question du vieillissement de la craie encore peu connu et mal appréhendé au regard des trois premières parties ou de la littérature.

Le Chapitre II a pour objectif de décrire les contextes hydrologiques, géologiques locaux et régionaux de trois carrières souterraines de craie étudiées. Ces carrières ont été choisies pour couvrir une certaine diversité de la craie. Elles permettent ainsi de faire un tour d'horizon, bien sûr non-exhaustif, des différentes manifestations de l'interaction eau-craie mais également de faire apparaître les conditions de cette manifestation en fonction de la typologie de la craie et de leurs configurations d'exploitation.

Le Chapitre III a pour but d'apporter une connaissance plus précise et rigoureuse des trois craies étudiées. Il se décline en deux sous-parties. La première présente les propriétés physiques des craies étudiées et leur rapport à l'eau. L'objectif essentiel de cette caractérisation est de pouvoir discriminer les principaux facteurs du

comportement mécanique des craies et le rôle de chacun dans la relation eau-craie. La deuxième s'intéresse à la caractérisation du comportement mécanique à court terme des craies et fait le lien avec leurs propriétés physiques. Elle permet, d'une part, de montrer que ce comportement mécanique dépend en grande partie de la porosité des craies mais également des minéraux qui les constituent ainsi que de leur agencement et d'autre part, d'analyser l'influence de l'hygrométrie sur ce comportement.

Le Chapitre IV se propose de répondre à la problématique posée par un possible vieillissement de la craie dans le cadre des carrières souterraines à travers les questionnements suivants : Comment cela se traduirait-il et pourquoi ? Quel serait le possible rôle de l'eau dans le mécanisme de vieillissement ? Quelles seraient les conséquences sur la stabilité des carrières souterraines dans le cas d'un vieillissement de la craie ? Ce chapitre permet d'une part de répondre à la problématique posée, mais également d'exposer les mécanismes possibles impliqués ainsi que les conditions d'application.

Le Chapitre V a pour but d'exposer la méthodologie et l'étude permettant d'apporter une connaissance plus précise du comportement différé des trois craies étudiées. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le comportement différé des craies au travers d'essais de fluage uniaxiaux, mais également d'analyser l'influence de l'eau et du déviateur sur ce comportement à long terme. Pour atteindre cet objectif, deux séries d'essais de fluage (par craie considérée), une à sec et l'autre à hygrométrie contrôlée sont mises en place sur une longue période. Elles permettent de montrer que ce comportement dépend d'une part de la microstructure-minéralogie de la craie mais également du couple déviateur-hygrométrie. Nous avons également évalué, à partir d'un protocole expérimental approprié, l'effet d'un ennoyage brutal de la craie pouvant survenir lors d'une crue. Nous verrons que cet ennoyage provoque la rupture des échantillons et que le laps de temps entre ennoyage et rupture dépend entièrement de la craie considérée. Les données *in situ* contribuent à aborder les questions relatives aux limites du champ d'expérimentation et à la fréquence d'occurrence des phénomènes environnementaux (remontée de la nappe, pluviométrie, etc...) ainsi qu'aux corrélations entre les différents phénomènes caractérisant l'interaction eau-roche.

Chapitre I : Généralités sur l'aspect phénoménologique de la craie

Résumé :

Le présent chapitre a pour but d'exposer la phénoménologie du comportement de la craie en fonction de ses caractéristiques physiques et mécaniques, et du contexte dans lequel elle évolue. Il est structuré en quatre parties.

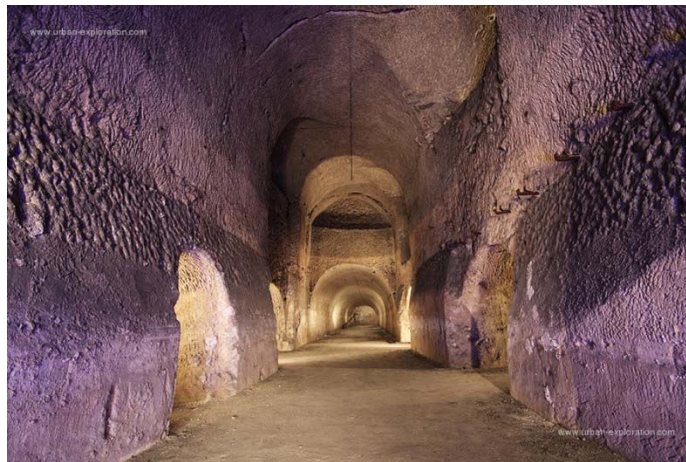
La première partie concerne la genèse, la composition minéralogique et la pétrographie de la craie, la deuxième et la troisième synthétisent les données disponibles dans la littérature et relatives aux propriétés physiques et mécaniques en insistant sur les interactions eau/craie. Enfin la dernière se focalise sur la question du vieillissement de la craie encore peu connu et mal appréhendé au regard des trois premières parties ou de la littérature.

Mots-clés : *craie, structure, géologie, comportement mécanique, vieillissement*

I.1. INTRODUCTION

La craie est utilisée depuis des siècles dans le Bassin Parisien comme matériau de construction et de sculpture en raison de son abondance et de la facilité à la travailler. Elle fût notamment le matériau de prédilection pour la construction de monuments historiques comme la citadelle de Lille ou la cathédrale de Beauvais. La plupart des exploitations de craie, pour l'extraction des pierres à chaux ou de la pierre à bâtir, se présentent sous la forme de carrières souterraines.

Elles sont creusées à flanc de coteau en suivant la méthode des chambres et piliers. Les galeries sont en général larges et très hautes (environ 7 m à Meudon), avec une voûte couramment en forme d'ogive (Figure I.1). Les piliers sont plus ou moins réguliers suivant les années d'exploitation.



*Figure I.1 : Galerie de la carrière de craie de Montalets à Meudon
(Crédit : urban-exploration)*

La craie fût également l'objet de convoitise de la part des pétroliers du fait qu'elle dissimule un important gisement d'hydrocarbures dans la Mer du Nord, mais elle fût aussi le sujet de nombreuses études scientifiques ; la plupart faisant suite aux problèmes rencontrés lors de l'exploitation, puis de l'effondrement de l'exploitation à ce moment-là inexpliqué (gisement Ekofisk par exemple). Au fur et à mesure des études et des progrès dans les méthodes d'études, le comportement mécanique de la craie s'est révélé de plus en plus complexe.

Le présent chapitre n'a pour vocation que d'exposer la multitude de phénomènes pouvant être rencontrés dans la vie d'une craie de manière plus générale et de conduire une discussion sur les causes et conséquences possibles des mécanismes mis en jeu, notamment sur le long terme, sans entrer dans les détails de leur conceptualisation en termes d'équations constitutives.

I.2. DÉFINITION ET CARACTÉRISATION GEOLOGIQUE DE LA CRAIE

I.2.1. Définition

La craie est une roche sédimentaire marine poreuse caractéristique de la période du Crétacé Supérieur à classer dans la catégorie des calcaires d'accumulation d'origine biologique. Elle est formée majoritairement (voire exclusivement) de carbonate de calcium, sous la forme de grains microscopiques de calcite provenant de tests³ de nanoplanctons⁴.

Généralement de couleur claire, très poreuse et friable, la craie présente souvent certaines variations (Mortimore et Fielding 1989) dans sa composition minéralogique et sa pétrographie. Ces variations sont témoins pour la plupart de l'histoire géologique de la craie et sont à l'origine de l'hétérogénéité du comportement et des propriétés physiques et mécaniques. On retrouve parmi ces variations : des variations de couleurs (craies vertes, jaunes, grises, blanches) dépendant de la composition minéralogique (argiles, silice, etc) elle-même gouvernant la « dureté » de la craie. Diverses classifications de la craie ont vu le jour, se basant sur la texture (« packstone » suivant les classifications de Dunham et Folk), sur l'état de désagrégation, sur le nombre de fissures/fractures, la dureté, la densité sèche... Une des classifications les plus complètes est la classification de Lord (Lord 1994) qui se base sur la densité sèche, les discontinuités et leur espacement. Les sédimentologues s'accordent à ne donner l'appellation de « craie » qu'aux roches dont la part carbonatée est constituée d'au moins 50 % de tests de nanoplanctons. Une craie est dite « pure » lorsque la proportion de tests de calcite atteint une valeur de 80-85 % (Figure I.2).

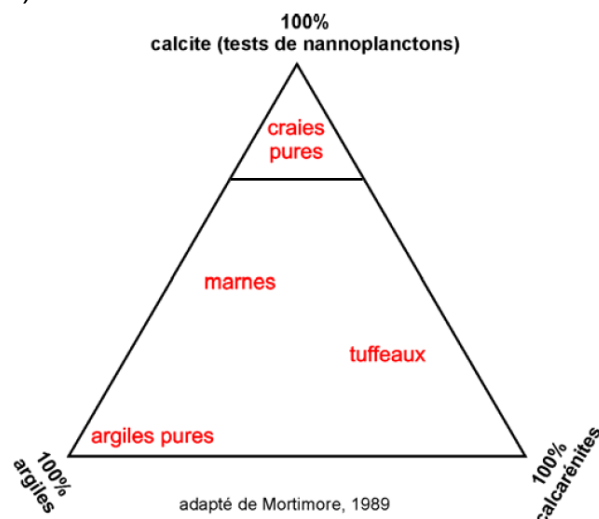


Figure I.2 : Diagramme ternaire craie – argiles – calcarénites (Schroeder 2002, adapté de Mortimore 1989)

³ Un test est une « coquille externe dure, calcaire ou chitineuse, de certains invertébrés » - Dictionnaire de l'Académie Française.

⁴ Les nanoplanctons représentent une classe de taille écologique du plancton (ensemble des animaux et végétaux flottant passivement dans les milieux aquatiques) qui est comprise entre 2 µm et 20 µm.

I.2.2. Sédimentologie

La craie est une roche sédimentaire considérée comme rare car elle est faiblement représentée géographiquement à l'échelle du globe. Présente presque exclusivement dans l'hémisphère Nord, ces dépôts caractéristiques se sont formés sous une tranche d'eau inférieure à 250 m et sur une courte période – du Cénomanién, Crétacé Supérieur, Mésozoïque au Danien, Paléogène, Cénozoïque. La très grande épaisseur des dépôts de craie atteignant parfois le kilomètre et la courte période de sédimentation (environ 35 Ma) témoignent de l'activité biologique très importante de la flore marine.

I.2.2.1. Pétrographie

On considère généralement que les craies sont constituées de trois phases : des restes d'origine biologique, une matrice amorphe et des minéraux détritiques.

I.2.2.1.1. Faune et flore

La craie est composée en très grande majorité de restes de coccolithes plus ou moins entiers. Les coccolithes sont des constructions en forme de doubles disques constituant la carapace (appelée coccosphère) d'algues unicellulaires eucaryotes du nannoplancton, les Coccolithophoridées (Figure I.3). Ces algues photosynthétiques dont la taille actuelle varie de 2 à 20 μm sont apparues à la fin du Trias et colonisent encore aujourd'hui le niveau supérieur de la colonne d'eau des océans. Ces organismes, à l'instar des diatomées avec la silice, captent dans l'eau des océans le carbonate de calcium dissous (sous formes d'ions calcium et hydrogénocarbonate) et construisent ces doubles disques au contact direct avec la cellule. Chaque plaquette de calcite composant les disques est reliée à sa voisine par des liaisons électrostatiques. Tout au long de sa vie, l'algue se débarrasse en pelant des coccolithes les plus externes qui sédimentent alors au fond des océans.

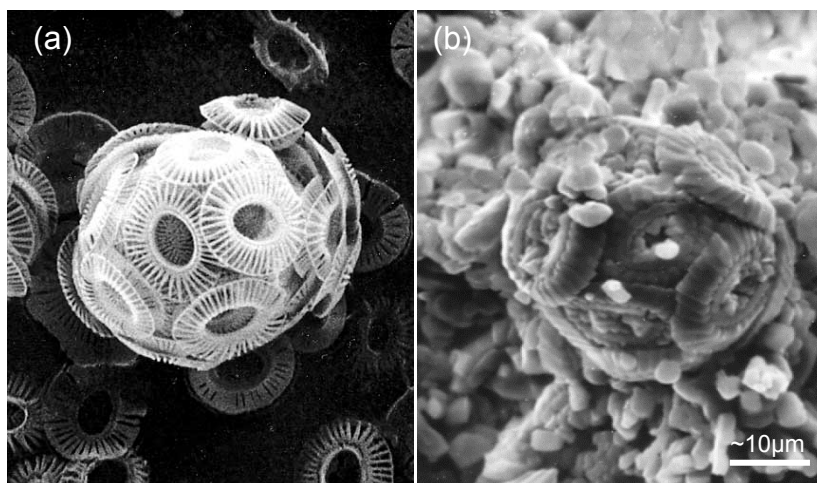


Figure I.3 : Coccosphères et coccolithes. (a) Coccosphère actuelle et coccolithes de l'espèce *Emiliana huxleyi* (Crédit : Centre des Pêches de l'Atlantique Nord-Ouest, Canada). (b) Coccosphère fossilisée (diamètre de +/- 30 μm) dans la craie Campanienne de Lixhe (Schroeder 2002)

Bien qu'étant les fossiles caractéristiques de la craie, les coccolithes ne témoignent pas seuls de l'activité biologique et géologique du Crétacé Supérieur. Des fossiles de tailles ou espèces différentes, et des minéraux accessoires originaires de terrains sous-jacents sont visibles suivant les étages. Par exemple, la craie renferme d'autres foraminifères, des oursins, des éponges, des ammonites et d'autres nanofossiles en quantité plus ou moins importantes et selon les étages.

I.2.2.1.2. Minéralogie

- *La Calcite*

La calcite est l'une des formes les plus stables chimiquement du carbonate de calcium CaCO_3 . Elle est un polymorphe de l'aragonite dont sont composées certaines coquilles d'animaux. Elle possède cependant une faible part de magnésium (Siwak 1994). Elle est en quantité plus ou moins importante suivant les dépôts/âges géologiques (Figure I.4). Les craies du Turonien et du Santonien sont moins pures et présentent plus de variations que les craies du Campanien ou du Maastrichtien.

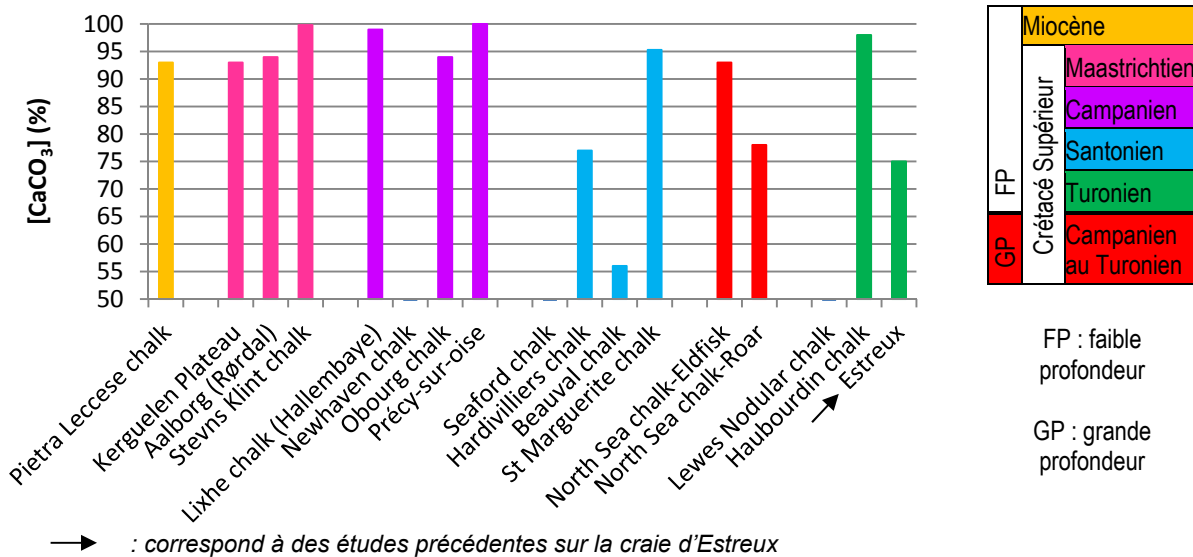


Figure I.4 : Teneur en carbonates de calcium suivant l'âge géologique de diverses craies (données issues du Tableau I.2)

La calcite se forme par précipitation chimique ou par sédimentation de restes de coquilles d'organismes marins (tests). Elle est incolore, cristallise dans le système trigonal (réseau rhomboédrique), possède un plan de clivage parfait et présente une dureté de 3 sur l'échelle de Mohs. Ses propriétés mécaniques principales sont résumées dans le Tableau I.1. La calcite est également très peu soluble dans l'eau pure (15 à 20 mg/L à température ambiante). La solubilité de la calcite d'après Morse et al. 2007, varie en fonction de sa teneur en magnésium : elle augmente dès lors que la fraction molaire de carbonate de magnésium augmente. Néanmoins, cette solubilité augmente dès que l'eau s'enrichit en dioxyde de carbone dissous (ou devient acide). La dissolution de la calcite s'opère selon une série de trois réactions chimiques réversibles (Chou et al. 1989, Plummer et al. 1978). La série de réactions

consomme des ions hydronium H^+ et libère des ions calcium Ca^{2+} et carbonate CO_3^{2-} . La vitesse de réaction dépend du pH en milieu acide et est constante lorsque le pH est à une valeur de 7.

Dans sa forme pure, la calcite est hydrophile (Jang et al. 1995, Thomas et al. 1993). En revanche, elle présente sous sa forme biogénique des affinités avec certaines molécules hydrophobes et résiste mieux à la dissolution. Cette différence avec la forme pure apporte à la forme biogénique des propriétés mécaniques et physiques particulières (voir le paragraphe suivant). Sa surface spécifique est de $1.1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ pour un rhomboèdre de $2 \text{ }\mu\text{m}$ et de $0.8 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ pour un rhomboèdre de $3 \text{ }\mu\text{m}$; il est important de rappeler que la surface spécifique est inversement proportionnelle à la taille des cristaux.

Tableau I.1 : Masse volumique et déformabilité d'un cristal de calcite et d'autres composants de la craie (d'après Ahrens 1995 et Nye 1985)

Légende : E_x , E_y et E_z sont les modules de Young suivant les trois directions x, y et z. G et K_s correspondent au module de cisaillement et de compressibilité du minéral. ρ représente la masse volumique du minéral.

Minéral	Formule	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	G (GPa)	K_s (GPa)	E_x (GPa)	E_y (GPa)	E_z (GPa)
Calcite	$CaCO_3$	2.712	32.0	73.0	144	144	84.0
α -Quartz	SiO_2	2.648	44.3	37.8	86.6	86.6	106.1
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	2.795	45.7	94.9	205	205	113
Muscovite	$KAl_2[(OH, F)_2]AlSi_3O_{10}$	2.844	35.3	58.2	184.3	178.4	59.1

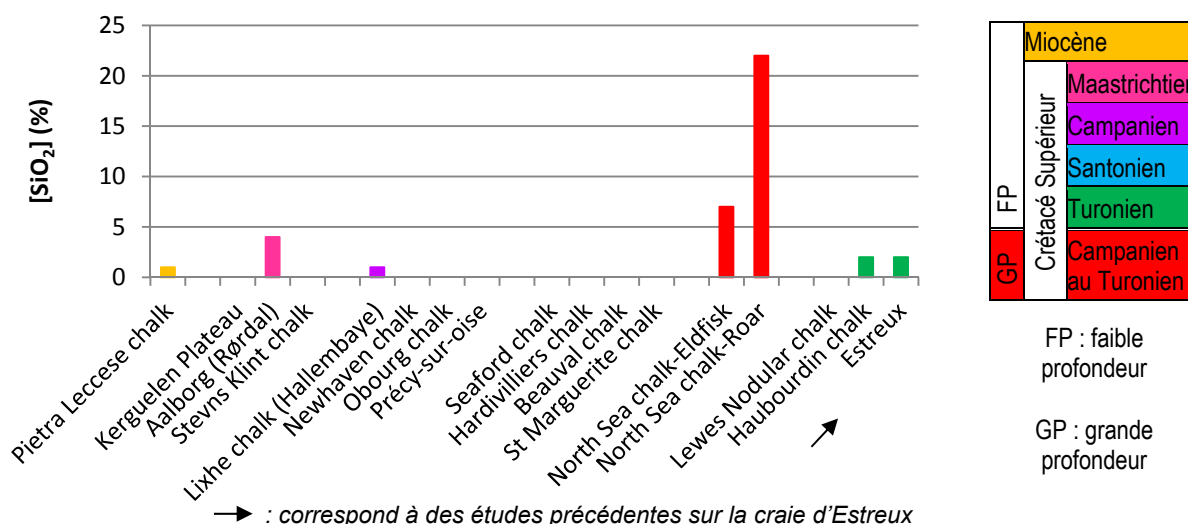
Sous sa forme cristalline la maille élémentaire est constituée de deux groupes : le groupe Ca (chargé positivement) et le groupe CO_3 (chargé négativement). Pour ce dernier les liaisons C-O sont très rigides donc considérées comme covalentes et sont 4 fois plus fortes que les liaisons O-Ca. Chaque atome d'oxygène est relié à 2 Ca. La calcite peut alors être considérée comme un dipôle, chimiquement parlant.

- *Autres composants*

La craie n'est pas toujours constituée exclusivement de calcite (voir Tableau I.2). La silice est le deuxième élément constitutif le plus représenté de la craie (Fabricius 2007, Monjoie et al. 1985), atteignant parfois jusqu'à 50 % de sa composition minéralogique. Sa présence dans la craie, sous forme dispersée ou concentrée, est le plus souvent d'origine détritique. Pour les craies de Mer du Nord, la proportion élevée en silice (en rouge sur la Figure I.5) provient du mode de sédimentation particulier de ces craies (voir § I.2.2.2). Elle est présente le plus souvent sous sa forme amorphe (calcédoine), et peu sous forme de quartz. On la retrouve également à plus grande échelle sous forme de bancs de silex facilement reconnaissables dans le paysage. Suivant la teneur en silice le comportement mécanique de la craie peut rapidement s'améliorer. Pour les craies affleurantes présentes sur la Figure I.5 (FP), elle peut s'expliquer par la proximité des terres émergées lors du dépôt des boues crayeuses (apports terrigènes).

Parmi les autres minéraux accessoires, la composition de la craie inclut suivant les endroits et les étages de la dolomite, divers minéraux argileux (Strand et al. 2007), des phosphates sous forme d'apatite et de feldspaths (Hjuler et Fabricius 2009), des sulfures de fer (marcassite généralement), etc. La nature des minéraux accessoires dépend essentiellement de l'environnement de dépôt, leur présence étant le plus souvent d'origine détritique (parfois volcanique).

La glauconie est un silicate de fer hydraté de la famille de la muscovite. Sa couleur foncée caractéristique est due à la réduction du fer en ion ferreux (Fe^{2+}). Elle dérive de l'altération de minéraux ferromagnésiens (comme les micas). Le minéral précipite lors de la diagenèse précoce en milieu réducteur, induit par la décomposition de matière organique. On la retrouve généralement dans les craies du Cénomaniens et du Turonien, lorsque la série stratigraphique comporte un Hard-ground⁵. Elle fait partie intégrante des minéraux argileux de par sa surface spécifique importante variant de $20 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ à $147 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ suivant sa pureté et les endroits (Wilson et al. 2014, Wilson 2013) et possède une densité variant de 2.40 à 2.95 g.cm^{-3} .



→ : correspond à des études précédentes sur la craie d'Estreux
Figure 1.5 : Pourcentage de silice suivant l'âge géologique de diverses craies (données issues du Tableau 1.2)

La dolomite est un minéral commun des roches sédimentaires. Elle cristallise dans le même système que la calcite mais n'appartient pas au même groupe d'espace. Elle résiste davantage à la dissolution que sa cousine. L'apatite sédimentaire a une origine chimique et/ou organique et on la retrouve dans les craies du Nord de la France (Hardivilliers, Beauval...) et du Sud-Est de l'Angleterre (Mortimore 2012), toutes datant du Santonien, mais également dans la craie phosphatée maastrichtienne du bassin de Mons en Belgique.

1.2.2.1.3. Microstructure

Les éléments constitutifs de la craie ne présentent pas d'orientation préférentielle. En conséquence, la craie est une roche structuralement isotrope. Au regard des

⁵ Un hard-ground est une « surface encroûtée d'oxydes de fer et de manganèse, traduisant un arrêt dans la continuité de la sédimentation, dans les sédiments marins » – Dictionnaire Larousse

photographies diverses prises au microscope électronique à balayage (MEB), la craie peut être considérée comme un matériau granulaire. Les grains de calcite sont reliés par adhérence ou coalescence. La liaison entre deux éléments constitutifs se fait soit par des liaisons faibles ioniques (ou de Van der Waals), soit par fusion partielle de deux éléments. Le premier cas est facilité lorsque la surface de contact entre les grains est grande, le second par des phénomènes de dissolution/recristallisation autour des zones de contact entre grains. La cimentation des différents éléments constitutifs de la craie est très faible voire presque inexistante. Pourtant, dans certains cas difficilement observables des ponts de calcite témoignent du phénomène (Figure I.6, Richard 2008, Schroeder 2002).

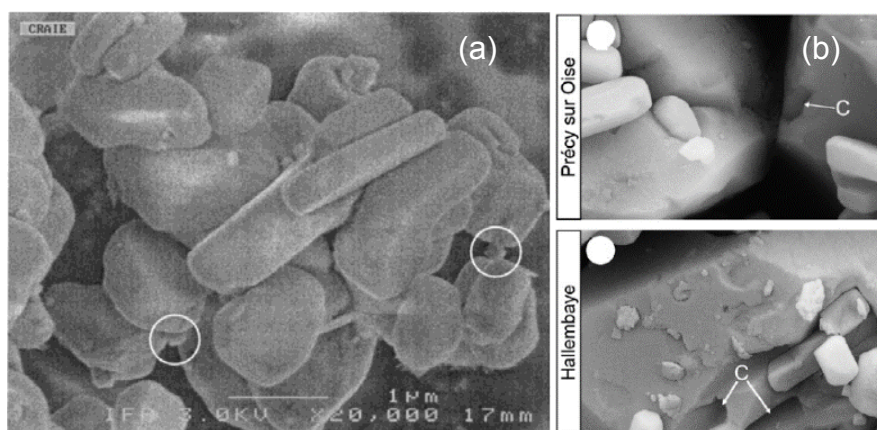


Figure I.6 : Ponts de calcite. (a) Schroeder 2002 d'après Mata 2001, (b) Hjuler et Fabricius 2009. C : ciment de contact

Il a été énoncé plus haut une affinité de la calcite biogénique avec les molécules hydrophobes (voir le paragraphe précédent). L'effet est dû à l'existence d'une fine pellicule argileuse (Figure I.7) à la surface des grains de craie (Okhrimenko et al. 2014, Skovbjerg et al. 2013, Skovbjerg et al. 2012). Les particules d'1 à 4 nm de large ont poussé directement sur les grains sans apport extérieur et n'ont pu être mises en évidence que par microscopie à force atomique (AFM). Ces observations vont dans le sens d'un modèle contextuel des forces de liaisons interparticulaires de Schroeder 2002 et Bois 2000 pour les craies de Mer du Nord.

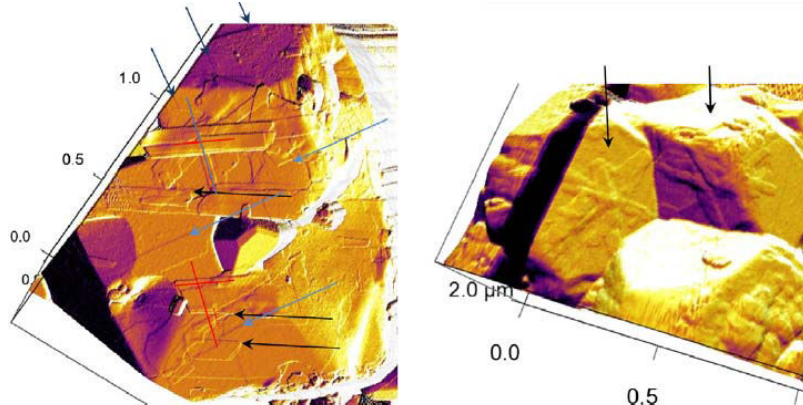


Figure I.7 : Images des nanoparticules d'argiles (feuilletés indiqués par les flèches) sur des grains de calcite. Craie de Mer du Nord. (Skovbjerg et al. 2012)

I.2.2.2. Importance de l'environnement de dépôt et de l'histoire géologique

Pour la craie, la diagenèse⁶ est assez limitée puisque les deux principaux aspects de diagenèse dans les roches carbonatées, à savoir la cimentation et la transformation iso-chimique, ne sont pas beaucoup représentés dans les craies et ce même pour les craies de la Mer du Nord enfouies à plus de 3 km de profondeur. Pour une grande partie des craies affleurantes, cela s'explique en partie par la faible profondeur des couches et la présence inhibitrice de magnésium dans la composition de la calcite (Scholle 1977).

Pour les craies de la Mer du Nord (et certaines craies précédemment enfouies puis remontées en surface), les sédiments fins argileux qui les recouvrent tendent à empêcher l'expulsion du fluide lors de l'enfouissement, bloquant ainsi les phénomènes de compaction (diminution de la contrainte effective).

Suite à leur diagenèse plus ou moins marquée, les craies de la Mer du Nord (et celles précédemment enfouies puis remontées) répondent, physiquement et mécaniquement, d'une manière différente de celles qui affleurent ou situées à faible profondeur. Il est donc nécessaire de prendre en compte la profondeur des gisements – donc leur histoire diagénétique – dans l'analyse des mécanismes et des phénomènes prenant place dans la craie.

I.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

I.3.1. Porosités et masses volumiques

L'une des caractéristiques majeures de la craie est sa très forte porosité (de 9 à 52 %). La complexité du réseau poreux est due à l'interconnexion entre les pores et leur accessibilité à un fluide, conséquences de la structure de la craie. La porosité est un facteur majeur dans les phénomènes mécaniques des craies. Plusieurs méthodes peuvent être appliquées afin d'avoir une idée globale du type de porosité matricielle rencontrée (Figure I.8) :

- la méthode des pesées consiste à déterminer indirectement la porosité totale (occluse + connectée) par mesure des masses volumiques sèche et des grains et la porosité connectée par mesures des masses volumiques sèche et saturée. Cette méthode ne donne cependant pas d'indications sur la structure du milieu poreux, à savoir si la porosité est matricielle ou due à de la fissuration ;
- l'analyse des images MEB donne quant à elle une « image » de la porosité matricielle. La tomographie aux rayons X donne une distribution de la porosité n (seule l'échelle et la gamme varient) ;
- la mesure directe par porosimétrie à mercure reste la méthode la plus précise pour la détermination de la porosité connectée. Elle donne entre autres, la

⁶ La diagenèse est l'ensemble des processus physique, biochimique et physico-chimique qui interviennent dans la transformation des sédiments en roches sédimentaires lors de leur enfouissement.

distribution des rayons de pore au sein de l'échantillon, ainsi qu'une idée de la tortuosité du milieu poreux, par les valeurs de porosités libre et piégée ;

- la mesure de la surface spécifique⁷ SS permet d'obtenir d'autres informations, notamment sur les propriétés d'adsorption.

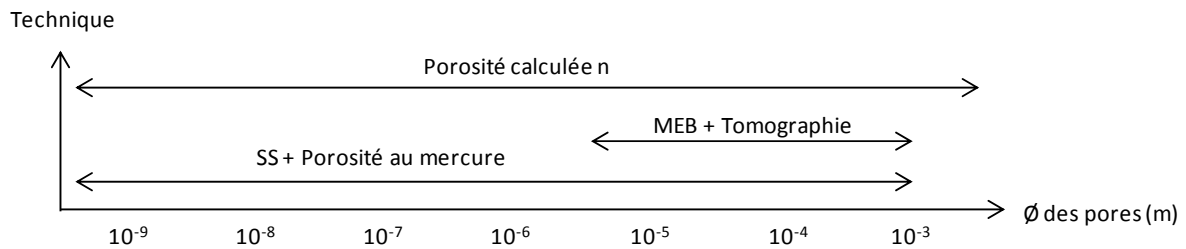


Figure I.8 : Diagramme de résolution de différentes méthodes de caractérisation de la porosité suivant le diamètre des rayons de pores

La plupart des craies du Crétacé Supérieur présentent des profils porosimétriques similaires (même gamme de rayons de pores) avec quelques variations suivant les faciès (valeurs de porosité dans le Tableau I.2). Les perméabilités sont de l'ordre de 10^{-14} et 10^{-15} m². Il est intéressant de préciser que les valeurs de porosité calculée par la méthode des pesées diffèrent peu de celles mesurées au porosimètre à mercure. Il convient toutefois de préciser que la plupart de ces mesures requièrent l'utilisation d'un fluide non mouillant et/ou n'interagissant pas avec la craie.

La Figure I.9 présente des valeurs de masse volumique sèche de diverses craies. Globalement, les masses volumiques tournent aux alentours de 1.50 g.cm⁻³ pour les craies turoniennes et santoniennes. Mais elles présentent davantage de variation pour les craies campaniennes et maastrichtiennes.

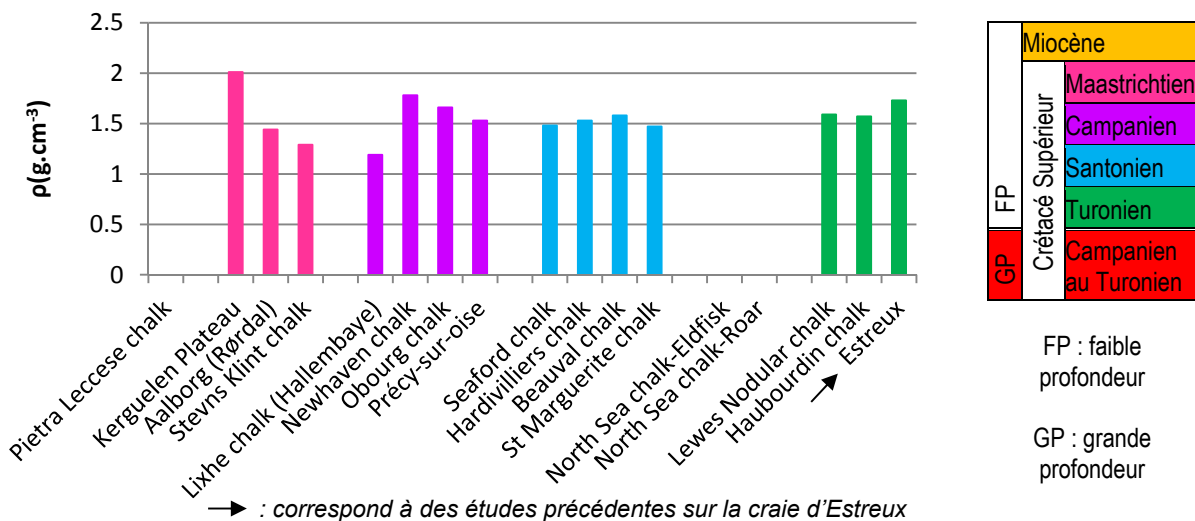


Figure I.9 : Masse volumique sèche de diverses craies suivant l'âge géologique (données issues du Tableau I.2)

⁷ La surface spécifique désigne la surface réelle d'un objet par opposition à sa surface apparente.

Tableau I.2 : Synthèse de données bibliographiques sur la craie

Légende : ρ_d et ρ_s : masses volumiques respectivement sèche et des grains ; n : porosité connectée (méthode des pesées) ; R_c : résistance en compression uniaxiale ; E : module de Young ; $[CaCO_3]$ et $[SiO_2]$: teneurs respectives de carbonate de calcium et de silice ; En rose : craies profondes de Mer du Nord. * Valeurs moyennes. – la valeur n'a pas été renseignée.

■Références : [a] Brignoli et al. 1994, [b] Maranini et Brignoli 1999, [c] Risnes et al. 2003, [d] Risnes et al. 2005, [e] Heggheim et al. 2005, [f] Hjuler et Fabricius 2009, [g] Nadah et al. 2013, [h] Madland et al. 2011, [i] Madland et al. 2001, [j] Delage et al. 1996, [k] Risnes et Flaageng 1999, [l] Homand et Shao 2000c, [m] Schroeder 2002, [n] De Gennaro et al. 2003, [o] De Gennaro et al. 2004, [p] Monjoie et al. 1990, [q] Duperret et al. 2005, [r] Korsnes et al. 2008, [s] Nguyen 2009, [t] Alam et al. 2012

Age géologique	Appellation	ρ_d (g.cm ⁻³)	ρ_s (g.cm ⁻³)	Surface spécifique (m ² .g ⁻¹)	Perméabilité (m ²)	n^* (%)	R_c^* (MPa)	E^* (GPa)	[CaCO ₃] (%)	[SiO ₂] (%)	Réfé	
Miocène	Pietra Leccese chalk	-	2.62	-	6.10 ⁻¹⁵	36	28	24	93	1	[a][b]	
Crétacé supérieur	Maastrichtien	Kerguelen Plateau	2.01	2.72	3.9	-	42	19	-	93	-	[t]
		Aalborg (Rørdal)	1.44	2.72	3.6	4.10 ⁻¹⁵	47	10	-	94	4	[c]
		Stevens Klint chalk	1.29	2.76	1.7	2.10 ⁻¹⁵	47	8.5	-	99.8	-	[e][i]
	Campanien	Lixhe chalk (Hallembaye)	1.19	2.71	9	1.10 ⁻¹⁵	42	6	-	98	2	[j][k][l][m][n][o][c][d][r]
		Newhaven chalk	1.78	-	-	-	34	2.7	0.3	-	-	[q]
		Obourg chalk	1.66	2.72	3.4	2.10 ⁻¹⁵	39	-	-	94	-	[f]
		Précy-sur-oise	1.53	2.69	1.5	7.10 ⁻¹⁵	43	-	-	100	-	[f]
	Santonien	Seaford chalk	1.48	-	-	-	40	3	0.23	-	-	[q]
		Hardivilliers chalk	1.53	2.81	3.2	1.10 ⁻¹⁴	46	-	-	77	-	[f]
		Beauval chalk	1.58	2.91	6.9	3.10 ⁻¹⁴	46	-	-	56	-	[f]
		St Marguerite chalk	1.47	2.73	2.1	7.10 ⁻¹⁵	46			95.3	-	[f]
	Camp. à Tur.	North Sea chalk-Eldfisk	-	-	-	2.10 ⁻¹⁵	36	-	-	93	7	[p]
		North Sea chalk-Roar	-	-	-	2.10 ⁻¹⁵	48	-	-	78	22	[p]
Turonien	Lewes Nodular chalk	1.59	-	-	-	41	3.9	0.4	-	-	[q]	
	Haubourdin chalk	1.57	2.77	-	2.10 ⁻¹⁵	42	14.7	10	98	<2	[g]	
	Estreux	1.73	2.74	14	-	37	10.3	2.83	75	2	[s]	

Ces valeurs présentent une bonne corrélation avec leur porosité totale n (Figure I.10) pour les craies turoniennes, campaniennes et maastrichtiennes. En effet pour un volume et une composition donnés, si l'une augmente, l'autre diminue et inversement. Les deux grandes exceptions sont la craie du plateau de Kerguelen (Océan Indien) et la craie de Lixhe pour lesquelles le poids de la porosité dans leur masse volumique n'est pas le même, alors qu'elles comportent toute deux une part de silice non négligeable. Les craies santoniennes ne semblent pas montrer une corrélation explicite entre masse volumique et porosité, le poids de la pureté de la craie et la nature des minéraux accessoires influençant ici les valeurs.

La craie à l'échelle du massif est un milieu à double porosité. Le déplacement des fluides dans le massif se fait alors suivant deux chemins différents : (a) la matrice, correspondant aux pores et à la microfissuration (bien que rare) et (b) le massif, où la porosité de fissure prédomine. Ce qui signifie que, suivant l'échelle à laquelle on se place, le poids de l'un ou de l'autre dans le déplacement des fluides dépendra donc en très grande partie de l'état de fissuration du massif mais également de la tortuosité du milieu poreux matriciel et de la perméabilité. La porosité et la perméabilité sont très souvent reliées dans les craies à condition de considérer la taille et la forme des particules (Schroeder 2002). La corrélation est d'autant plus forte que la texture de la craie est homogène.

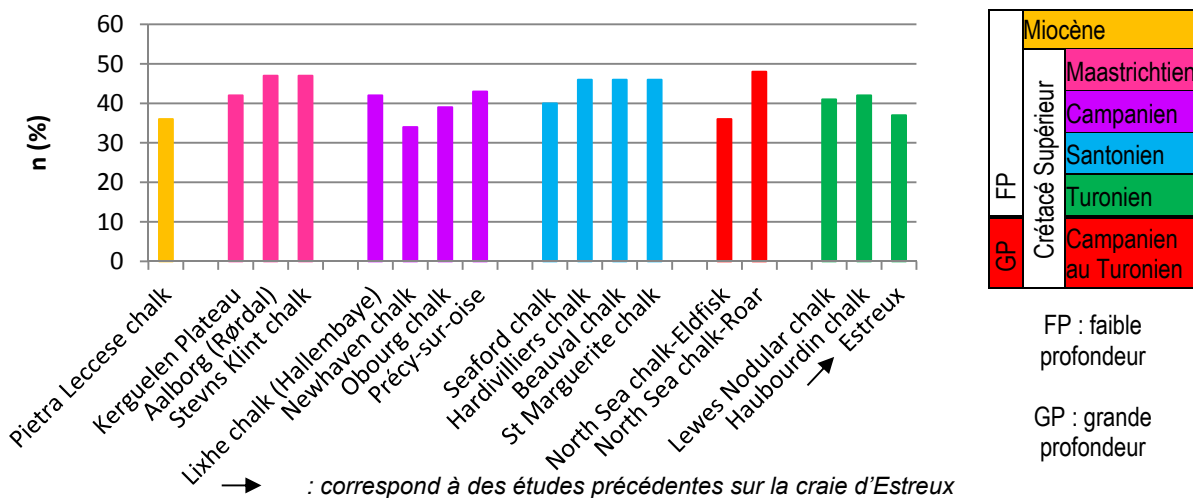


Figure I.10 : Porosité matricielle de diverses craies suivant l'âge géologique (données issues du Tableau I.2)

La Figure I.11 présente les perméabilités intrinsèques de diverses craies. Les craies de grande profondeur (Mer du Nord) illustrent assez bien l'influence de la texture sur les valeurs de perméabilité intrinsèque (Schroeder 2002, Monjoie et Schroeder 1996, Monjoie et al. 1990, Monjoie et al. 1985). En effet dans le cas des craies de Roar et Eldfisk (Mer du Nord), les deux craies présentent les mêmes valeurs de perméabilité intrinsèque, mais diffèrent par leur porosité et leur hétérogénéité. La craie de Roar est plus poreuse mais présente plus de quartz et des grains de forme différente, et la craie Eldfisk est moins poreuse mais présente moins de quartz et une taille de grain plus homogène (Monjoie et al. 1990).

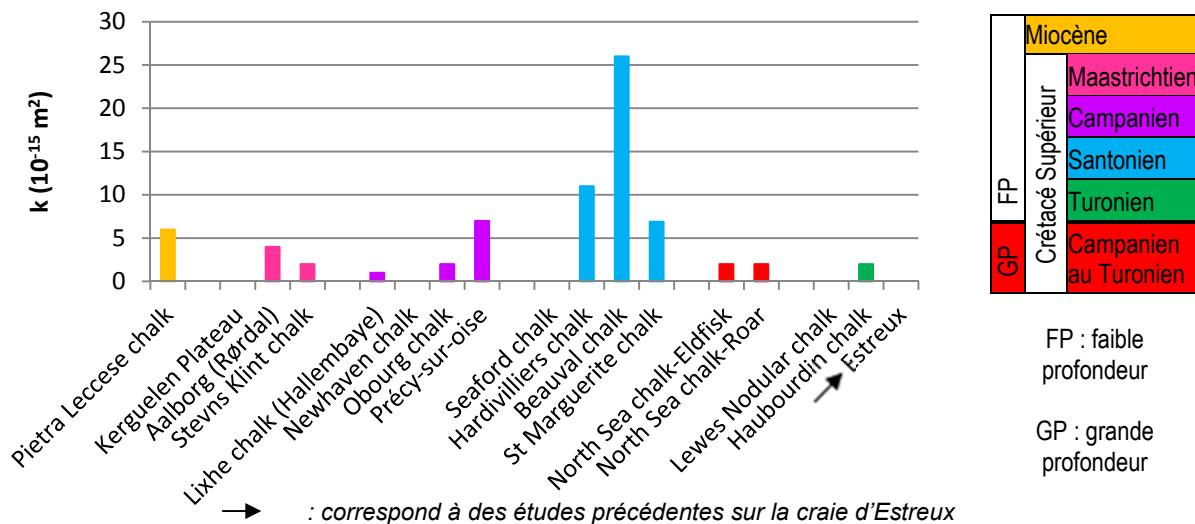


Figure I.11 : Perméabilité intrinsèque de diverses craies suivant l'âge géologique (voir Tableau I.2)

On ne peut cependant expliquer de manière formelle, au regard de l'absence de données sur la forme des grains des craies considérées, pourquoi les craies du Santonien sont plus perméables que les autres. On peut néanmoins trouver – avec une certaine réserve – une corrélation entre la pureté de la craie via la teneur en CaCO₃ (Figure I.4) et la valeur de perméabilité intrinsèque.

I.3.2. Interaction eau-craie

Les interactions eau/craie sont des phénomènes fondamentaux qui conditionnent le comportement mécanique. Il existe plusieurs types d'eau dans les craies, mais on ne retiendra que l'eau interstitielle qui s'élimine totalement vers 100°C. Les autres types d'eau ne disparaissent que lorsque le matériau est placé à très haute température : l'eau adsorbée chimiquement ne s'élimine qu'à partir de 300°C. La craie sèche, dans les conditions normales de température et de pression contient encore une part d'eau non négligeable, participant en partie à sa cohésion (phénomène de succion).

I.3.2.1. Phénomènes de capillarité dans les craies

Les grains sont reliés entre eux par des forces répulsives et capillaires. Les premières se créent lorsque deux faces de grains de calcite rentrent en contact, les deuxièmes lorsque l'eau forme des ménisques capillaires et rapproche les grains par succion (Risnes et Flaageng 1999). Les grains et les ponts liquides tendent à s'arranger de façon à minimiser l'énergie capillaire.

Les variations d'hygrométrie lors des cycles de séchage-mouillage entraînent des variations de volume (Nguyen 2009, Nguyen et al. 2008, Priol et al. 2007, Delage et al. 1996, Josa et al. 1987). Lorsque la pression capillaire est trop faible (hygrométrie trop importante donc succion faible), au lieu de rapprocher les grains, l'eau a tendance à détruire les liaisons capillaires et électrostatiques (Xie et Shao 2006, Schroeder et Shao 1996, Andersen et al. 1992).

Les mesures de vitesses d'ondes ultrasonores donnent une idée des étapes de remplissage des pores et du stade de saturation pour lequel l'eau a une influence sur la structure. Dans le cas de la craie de Lixhe partiellement saturée (Figure I.12, Broux 2010, Schroeder 2002), tant que le degré de saturation est inférieur à 60 % la diminution des vitesses d'onde est due non seulement à une augmentation de la masse par l'apport d'eau mais aussi à la multiplication des interfaces air-eau (les ondes P sont déviées par réfraction et réflexion). Le réseau poreux est alors perçu comme un milieu biphasé. Néanmoins lorsque le degré de saturation augmente au-delà de 60 % les vitesses augmentent. Certains pores sont alors complètement remplis, augmentant ainsi le module de compressibilité apparent de la roche en diminuant les interfaces.

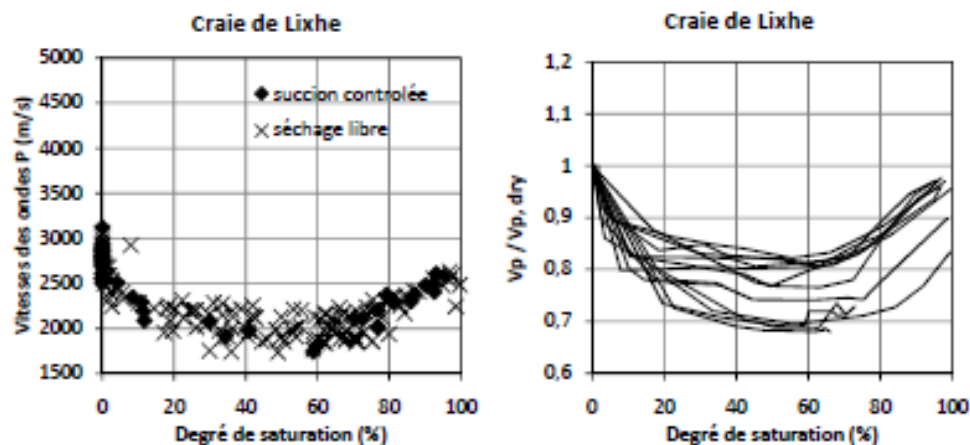


Figure I.12 : Vitesse des ondes P mesurées sur la craie de Lixhe en fonction du degré de saturation (Broux 2010)

Pour avoir une idée du type de pores préférentiellement remplis, les courbes de rétention, donc la capacité du matériau à attirer/retenir un fluide au sein de son réseau poreux, sont un outil indispensable. Les profils porosimétriques traduits en courbe de rétention permettent d'appréhender dans un premier temps le type de pores préférentiellement remplis. En effet, dans le cadre même de la porosimétrie au mercure ce sont les gros pores qui se remplissent aux plus faibles pressions d'injection. Pour l'eau, ce sont les petits pores qui se remplissent d'eau libre en premier. Cette différence est due au fait que l'eau et le mercure sont des fluides respectivement mouillant et non mouillant. Un exemple de courbe de rétention est donné en Figure I.13.

On observe généralement un phénomène d'hystérésis entre les chemins d'imbibition et de séchage s'expliquant (Delage et Cui 2000) par les interconnexions de pores de taille variable, en série ou en parallèle (phénomènes de piégeage). De plus, si l'on parle d'énergie, cela s'explique également par le fait qu'enlever des molécules d'un système énergétiquement plus important et plus stable demande davantage d'énergie que si le système était moins stable. Les changements de concavité des courbes de rétention traduisent une transition entre le remplissage de deux gammes de pores et la distance entre deux changements de concavité donne une indication

relative sur la proportion de la gamme de pores définie par ces deux changements. La pente entre deux changements de concavité donne une indication sur la largeur du spectre des rayons de pores. Pour les craies, les courbes de rétention ne présentent généralement qu'une seule gamme de pores majeurs.

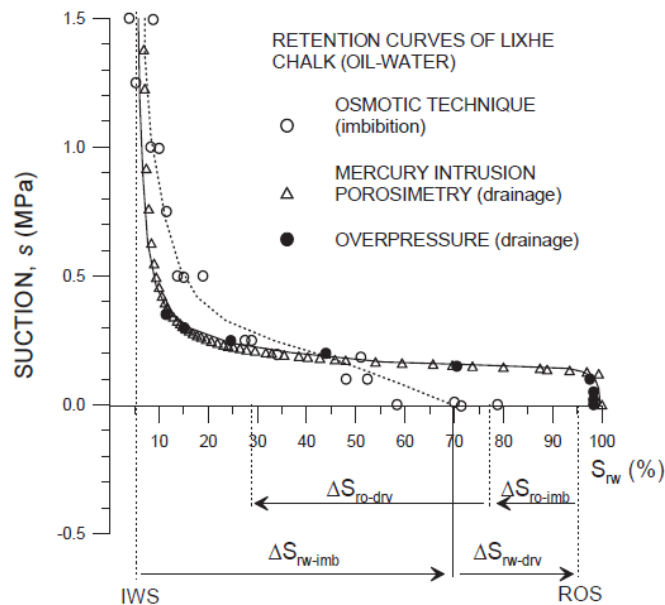


Figure 1.13 : Diagramme pression capillaire (suction) vs degré de saturation de la craie de Lixhe (eau-huile) (Schroeder et al. 2003)

Les courbes de rétention d'eau dans le cas du couple air-eau peuvent s'obtenir classiquement par deux méthodes, à savoir la méthode des solutions salines et la méthode osmotique, mais un adsorbmètre peut tout aussi bien produire ce type de résultats (exemple en Figure 1.14).

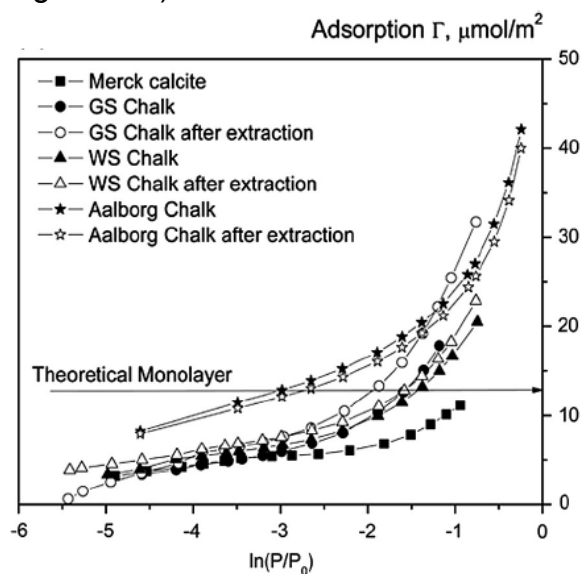


Figure 1.14 : Isothermes de sorption (ici 20°C) de diverses craies de Mer du Nord obtenus à l'aide d'un adsorbmètre (Okhrimenko et al. 2014)

I.3.2.2. Interactions physico-chimiques

Les interactions physico-chimiques font partie des phénomènes fondamentaux gouvernant le comportement mécanique (Heggheim et al. 2005, Hellmann et al. 2002a, Hellmann et al. 2002b, Djebbi 1984, Newman 1983). La sensibilité de la craie à la nature du fluide saturant prend ici toute son importance : certains éléments sont plus réactifs que d'autres (Madland et al. 2011) et la réactivité potentielle du fluide influencerait les phénomènes d'adsorption et de capillarité. Suivant sa réactivité, le fluide peut modifier la surface de charge de la craie (Abdallah et Gmira 2013) - mais aussi les propriétés mécaniques : plus l'eau est réactive, plus la cohésion relative est importante (Risnes et al. 2005, Risnes et al. 2003). Cependant la couche d'eau adsorbée ne change pas d'épaisseur en fonction de la taille du pore mais dépend de chaque craie (Megawati et al. 2012). Selon la catégorie de porosité, le type d'eau, adsorbée ou libre, est en plus ou moins grande proportion : s'il s'agit d'une microporosité ($\phi < 3$ nm) l'eau est sous-adsorbée uniquement, s'il s'agit d'une mésoporosité ($50 \text{ nm} < \phi < 3 \text{ nm}$) l'eau est à la fois sous forme adsorbée et sous forme libre, s'il s'agit d'une macroporosité ($50 \text{ nm} < \phi$) l'eau libre est prépondérante sur l'eau adsorbée.

La forme de courbe de rétention (ou isotherme de sorption, Figure I.14) d'après la classification BDDT de Brunauer et al. 1940 est de type II. Ce type (voir Figure I.15) traduit une adsorption physique multicouche et une adsorption tendant vers l'infini dès lors que l'on se rapproche de la pression de vapeur saturante. Les deux changements de concavité ici permettent de délimiter trois zones : pour une pression d'injection faible, il s'agit d'une adsorption monocouche, pour une pression d'injection se rapprochant de la pression de vapeur saturante, il s'agit d'eau libre à l'intérieur des pores, le reste correspond à une adsorption multicouche (Jannot 2008). La surface spécifique d'un matériau, correspond au premier changement de concavité. Elle est inversement proportionnelle à la taille des grains. Pour un matériau monominéral, plus les grains sont petits, plus elle est importante, plus la surface d'échange, notamment l'énergie associée, est grande et plus les grains sont réactifs.

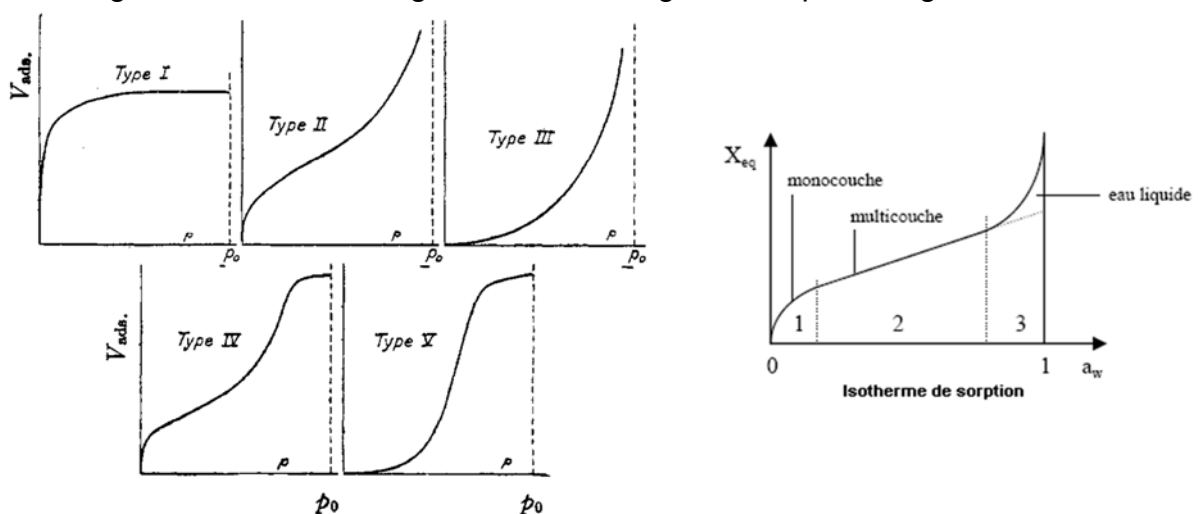


Figure I.15 : Les différents types d'isothermes de sorption suivant la classification BDDT de Brunauer et al. 1940 et délimitation des trois zones du type II

La Figure I.16 présente les surfaces spécifiques de diverses craies, en fonction de l'âge géologique. La surface spécifique dépend de la taille et la forme des grains. Cependant elle ne semble pas être reliée de manière directe, pour une valeur donnée, à aucune des propriétés présentées dans les paragraphes précédents hormis la teneur en calcite. En comparant la Figure I.16 à la Figure I.4, et en gardant comme référence les craies dites « pures » (Stevens Klint, Lixhe et Précý-sur-Oise), on s'aperçoit que la surface spécifique d'une craie dite « pure » tourne autour de $1.7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

Parmi les craies du Crétacé Supérieur, les craies du Campanien et du Maastrichtien voire même du Turonien illustrent aussi bien cette tendance. Seules les craies du Santonien se démarquent des autres : la tendance semble beaucoup moins marquée.

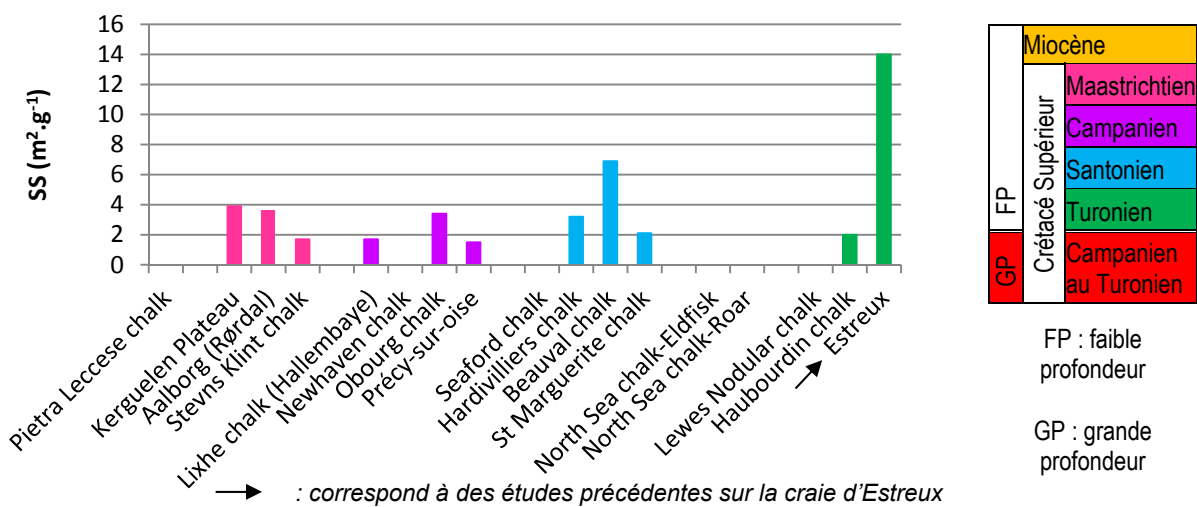


Figure I.16 : Surface spécifique de diverses craies suivant l'âge géologique (données issues du Tableau I.2)

En prenant en compte cette information, on peut très facilement relier la variation de la surface spécifique avec la pureté des craies, et ce pour toutes les craies du Crétacé supérieur rencontrées dans la bibliographie. Un modèle conceptuel (Figure I.17) des forces de liaisons interparticulaires a été proposé par plusieurs auteurs afin d'expliquer le comportement mécanique de la craie qui sera présenté plus loin.

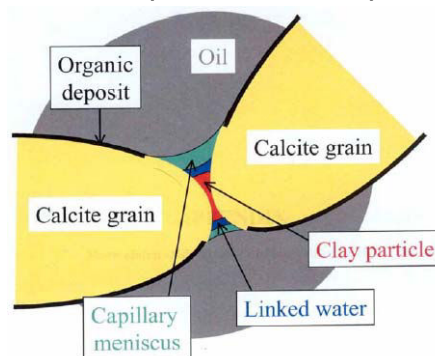


Figure I.17 : Modèle conceptuel des liaisons inter-particulaires pour une craie de Mer du Nord (Schroeder 2002, Bois 2000, Risnes et Flaageng 1999)

I.3.2.3. Phénomènes de dissolution-recristallisation

Rappelons que la calcite pure est hydrophile (Cf. § I.2.2.1.2). Une des actions de l'eau sur la craie reste le phénomène de dissolution-recristallisation, qui se traduit par la présence de ponts de calcite (Cf. § I.2.2.1.3) et des traces de dissolution. Ces deux phénomènes sont engendrés par les contraintes régnant dans le massif – une partie chargée mécaniquement est plus soluble qu'une partie non chargée mécaniquement – et l'interaction avec le fluide saturant. Les deux cohabitent dans la plupart des cas. La composition chimique des eaux de la craie est d'une importance considérable et différente suivant la formation sus-jacente : elle est généralement plus minéralisée sous recouvrement tertiaire que sous des alluvions et est connue comme agressive *in situ*, d'autant plus si elle est minéralisée (Filliat 1981).

La recristallisation peut être soupçonnée lorsque la taille et la forme des grains ne sont pas homogènes au sein de la matrice. Reeves et Rothman 2013 ont étudié l'effet du temps sur les phénomènes de recristallisation et de dissolution dans les carbonates en général. Les vitesses de dissolution et de recristallisation sont dépendantes d'une combinaison de plusieurs facteurs, à savoir : (a) l'environnement chimique, (b) les propriétés de transport, (c) la géométrie du matériau et (d) les réactions de surface du matériau au niveau moléculaire.

Cependant, les processus sont tout de même limités. Les facteurs limitants sont en majorité les propriétés de transport au sein du matériau, une quantité limitée de soluté et la vitesse de réaction. Néanmoins, plusieurs auteurs ont observé une diminution de ces vitesses de réaction en fonction du temps et une disparité entre les observations faites *in situ* et en laboratoire (Arvidson et al. 2003). L'une des explications provient de la durée de séjour du fluide saturant, et de la réactivité de celui-ci (Duperré et al. 2005), au sein du milieu poreux.

Pour la craie, l'occurrence de ces phénomènes - de la prépondérance de l'un par rapport à l'autre - dépend par conséquent entièrement de la chimie et/ou de la réactivité du fluide saturant, de sa durée de séjour (donc des propriétés de transport), de sa minéralogie (la craie peut présenter davantage de matière organique) et de l'état de contrainte dans lequel la roche évolue.

I.4. PHÉNOMÉNOLOGIE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE

Le comportement mécanique de la craie poreuse a été très largement étudié. Il a été démontré que son comportement était très complexe du fait de nombreux facteurs : il est gouverné par la faible cohésion, la sensibilité aux fortes contraintes et fort confinements, l'effondrement plastique des pores (« pore collapse ») (Schroeder 1995), la viscosité (fluage) (Dahou et al. 1995, Djebbi 1984), la porosité (Monjoie et al. 1990), la pression capillaire (Delage et al. 1996), la nature du fluide saturant (Priol et al. 2004) et la composition minéralogique des craies (Monjoie et al. 1990). À l'échelle du micromètre, la capillarité, les forces électrostatiques, les soudures minéralogiques évoluent lorsque la craie est sollicitée. Indépendamment des interactions fluide-squelette, la craie présente un comportement de type élasto-

viscoplastique (Schroeder 2002) avec des ruptures ductiles ou fragiles suivant les niveaux de contrainte et sa composition.

Les comportements mécaniques dépendant clairement de la nature du fluide saturant sont le pore-collapse, l'écoulement par fluidification, le comportement en compression et le fluage (Nguyen 2009, Priol et al. 2007, Priol 2005).

I.4.1. Généralités sur le comportement à court terme des craies

Pour rappel, conformément à ce qui a été annoncé dans l'introduction générale, l'expérimentation relative à ce comportement à court terme est abordée au Chapitre III.

I.4.1.1. Chargement hydrostatique

Un des phénomènes typiques de la craie se retrouve dans l'effondrement de son réseau poreux. Il s'agit du phénomène de « pore-collapse » (Homand et Shao 2000c, Homand et Shao 2000b, Homand et Shao 2000a, Schroeder 1995, Dahou et al. 1995, Monjoie et Schroeder 1989), et correspond à la transition entre la phase élastique et la phase plastique. A ne pas confondre avec un effondrement des composants intrinsèques (plaquettes de calcite, coccolithes, ...).

Le phénomène se produit généralement dans le cas de contraintes hydrostatiques (de l'ordre de 30 MPa pour Monjoie et al. 1990), de contraintes moyennes ou de confinements importants, lorsque la craie est située à grande profondeur comme dans la Mer du Nord. Les déformations volumiques mesurées en fonction de la contrainte hydrostatique sont présentées sur la Figure I.18.

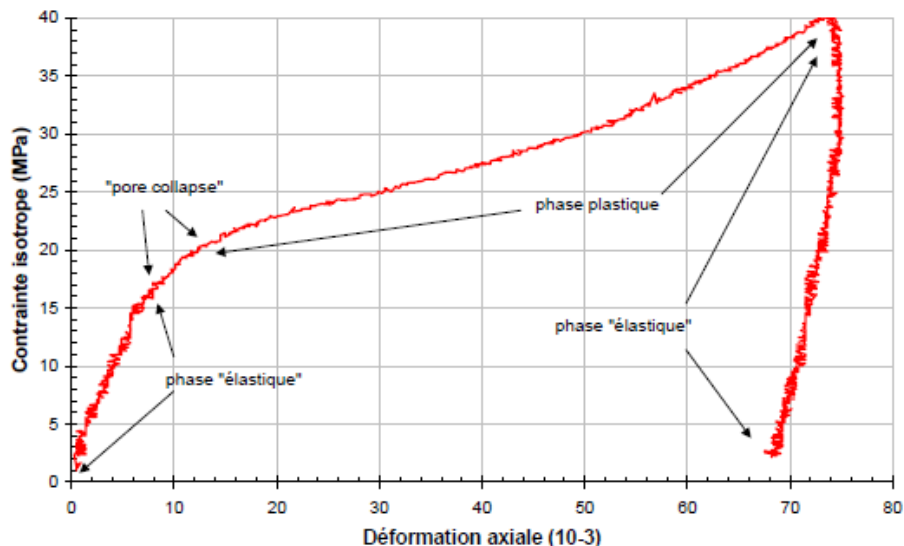


Figure I.18 : Essai de compression isotrope sur la craie de Lixhe saturée au Soltrol (Schroeder 2002)

Nous pouvons noter 3 phases distinctes : (a) Phase élastique (jusqu'à une contrainte-seuil P_{col}) : cette première phase présente typiquement un comportement élastique quasi-linéaire ; il existe cependant toujours une part visqueuse plus ou

moins importante en début de courbe rendant ainsi la mesure du module de compressibilité problématique ; (b) « Pore-collapse » : la seconde phase est caractérisée par une forte contractance plastique, conséquence de l'effondrement progressif de la structure poreuse par une rupture des ponts entre les grains solides de la craie et la croissance de la surface des contacts entraînant une augmentation de la compressibilité du matériau ; (c) Phase plastique : la dernière montre une densification de la craie par un écrouissage durcissant dû à la diminution importante de la porosité de la craie. Selon Monjoie et al. 1990, cela est causé par la rupture des liaisons physico-chimiques induisant des glissements entre les grains. Ce glissement n'est cependant pas visible au MEB.

Le phénomène de « pore-collapse » s'accompagne toujours d'une réduction de la porosité (Homand et Shao 2000a, Homand et Shao 2000b, Homand et Shao 2000c) pas forcément homogène : l'effondrement affecte préférentiellement certaines zones légèrement plus poreuses que d'autres sans que les autres ne soient affectées. Ceci est corroboré par le fait que les déformations plastiques sont d'autant plus importantes que la craie est poreuse (Xie et Shao 2006, Xie 2005, Schroeder 2002, Homand et Shao 2000a, Homand et Shao 2000b, Homand et Shao 2000c, Schroeder 1995, Monjoie et al. 1990). Cependant d'après la littérature, la variation de porosité entre l'avant et l'après ne dépasse pas 1%. Notons également que l'occurrence du phénomène de « pore-collapse » n'a pas d'influence (ou très très peu) sur la valeur du coefficient de compressibilité K_m de la matrice rocheuse, mesuré lors de la phase élastique.

La Figure I.19 présente les résultats d'essais oedométriques sur échantillons saturés au kérosène (fluide non mouillant). Tous les échantillons ont été soumis au même protocole expérimental et seules la porosité et la teneur en silice les distinguent. Selon Monjoie et al. 1990, il existe 4 types de comportements en fonction de la porosité de la craie :

- les craies à très basse porosité (moins de 32 %) ne présentent pas de « pore-collapse » pour un niveau de contrainte inférieur à celui des 60 MPa atteints en laboratoire ;
- les craies à basse porosité (32 à 37 %) pour lesquelles le « pore-collapse » est atteint entre 30 et 35 MPa ;
- les craies à haute porosité (37 à 45 %) pour lesquelles le « pore-collapse » est atteint entre 25 et 30 MPa ;
- les craies à très forte porosité (au-delà de 45 %) pour lesquelles le « pore-collapse » est atteint avant 20 MPa.

Le module de compressibilité K_m et le seuil de « pore-collapse » évoluent également ici en fonction de la teneur en silice.

Le phénomène de « pore-collapse » est d'autant plus accentué si la craie est saturée en eau (Homand et Shao 2000a) : le coefficient de compressibilité reste inchangé mais le seuil de « pore collapse » est atteint pour des contraintes plus faibles. La

nature même du fluide saturant et les interactions physico-chimiques ont donc une grande importance dans l'occurrence du phénomène. D'un point de vue purement énergétique, la calcite et l'eau sont des dipôles. De ce fait, la présence d'eau doit faire baisser l'énergie de liaison entre les grains en diminuant le nombre de liaisons faibles entre les grains de calcite.

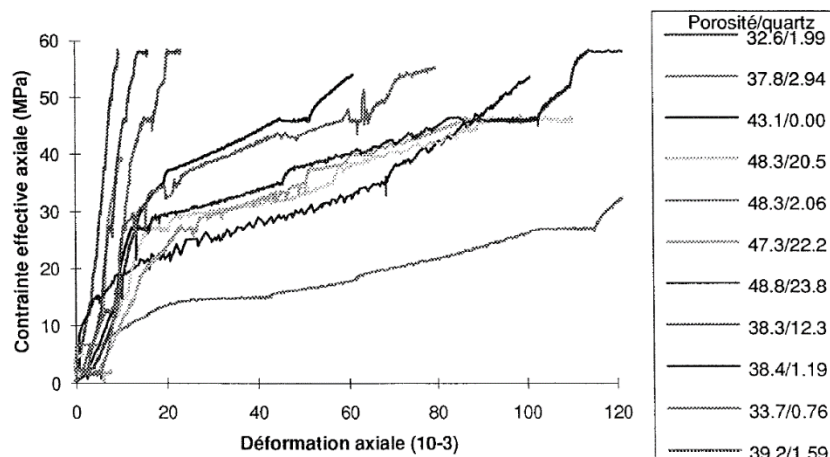


Figure 1.19 : Résultats d'essais œdométriques sur différentes craies en fonction de la porosité et la teneur en silice (Monjoie et al. 1990)

Les raisons d'occurrence du phénomène de « pore-collapse » et la cohésion toujours présente de la craie après effondrement des pores restent encore obscures malgré plusieurs explications possibles reliant le phénomène à la rupture des ponts de calcite (Risnes et al. 1994, Jones et Leddra 1989) ou à l'engrènement des grains, même si en effet ces deux phénomènes auraient tendance à provoquer un frottement et/ou une désolidarisation des grains plutôt que la contractance observée lors de ces essais (Schroeder 1995) – même chose pour le fluage.

La désagrégation de la craie et son extrusion ne s'effectuent que pour des contraintes bien supérieures au seuil de « pore-collapse » (Schroeder 1995). Il est cependant intéressant de noter qu'après extrusion, séchage et re-saturation à l'eau, les échantillons initialement partiellement saturés s'écroulent, contrairement aux échantillons initialement saturés à l'eau (sous vide ou non) ou re-saturés avec un fluide non mouillant. Rappelons que les phénomènes de « pore-collapse » et d'extrusion de la craie prennent place dans un contexte de roche réservoir où les contraintes et la température sont tout de même très élevées. Il s'agit donc d'un phénomène naturellement rare pour les craies de très faibles profondeurs, contrairement au phénomène de fluage.

I.4.1.2. Chargement déviatorique et traction

Le comportement à court terme ayant le plus de probabilité d'occurrence dans les craies affleurantes - tout au moins pendant leur exploitation - est le comportement en compression (ainsi que celui en traction). Ce type de comportement (voir Figure I.20) se traduit par un comportement fragile à élastoplastique avec écrouissage

radoucissant si le confinement est trop faible voire nul. Le comportement passe d'élastoplastique (radoucissant) à un comportement plus ductile avec écrouissage durcissant et la phase élastique se réduit dès lors que le confinement est plus important⁸. Au-delà d'un certain confinement, la phase élastique disparaît complètement (Schroeder 2002). La craie aurait donc plutôt un comportement élastoplastique avec écrouissage (Bisnovat et al. 2015, Korsnes et al. 2008, Nguyen et al. 2008, Xie 2005, Schroeder 2003, Schroeder 2002, Collin et al. 2002, Bahat et al. 2001, Homand et Shao 2000a, Homand et Shao 2000b, Homand et Shao 2000c, Siwak et al. 1994).

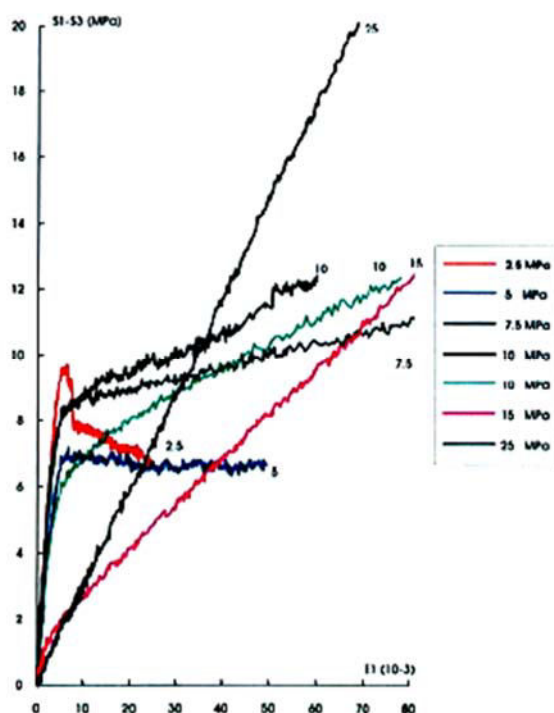


Figure 1.20 : Courbes contrainte-déformations résultant d'essais triaxiaux avec différents confinements sur des échantillons de craie de Lixhe (Schroeder 2002)

Au regard des données disponibles dans la littérature (voir Figure 1.21 et Figure 1.22 pour la résistance en compression simple et le module de Young) et toujours en mettant à part les craies de Mer du Nord à grande profondeur, on peut clairement discerner une certaine tendance dans la variation de la résistance en fonction de la place de la craie considérée dans l'échelle stratigraphique : plus on se rapproche du milieu de la colonne stratigraphique des dépôts de craie (Santonien - Campanien), moins la craie est résistante. Ceci peut s'expliquer en partie en raison des environnements de dépôts (apports terrigènes, diagenèse, colonne d'eau, changement de température, ...). Il reste néanmoins sûr que la majorité des craies possède une résistance faible. Le module de Young (Figure 1.22) semble suivre la même tendance.

⁸ Dans certains matériaux (sols généralement), il y a parfois dépendance du module E avec le contrainte moyenne ou le confinement.

Malgré les constatations avérées de Monjoie et al. 1990 pour les craies de Mer du Nord, la corrélation $[SiO_2]$ -Rc n'est pas claire pour les craies affleurantes. La concentration en silice n'est pas le facteur prépondérant pour les craies de faible profondeur. Il faut cependant rester prudent sur la quantité faible de données récoltées en rapport avec la résistance en compression. La résistance en compression, le module de Young et la masse volumique sont reliés.

Remarque : Le cas de la craie de Pietra Leccese est à aborder prudemment car sa formation date d'après la grande discordance géologique Crétacé-Tertiaire qui reste, encore maintenant, obscure.

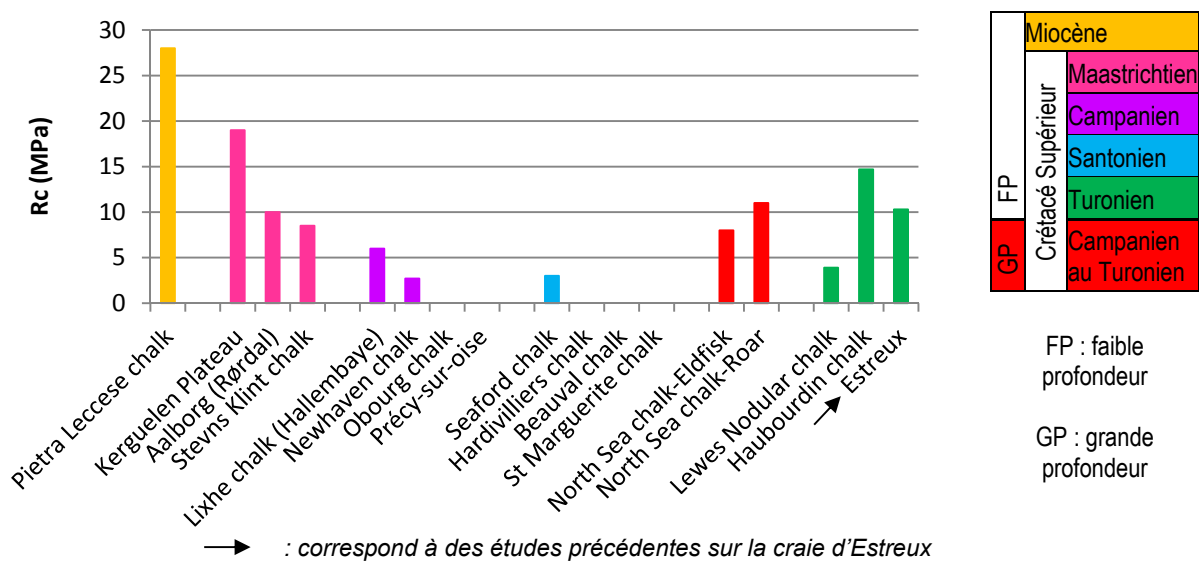


Figure I.21 : Résistance en compression uniaxiale de diverses craies suivant l'âge géologique (voir Tableau I.2)

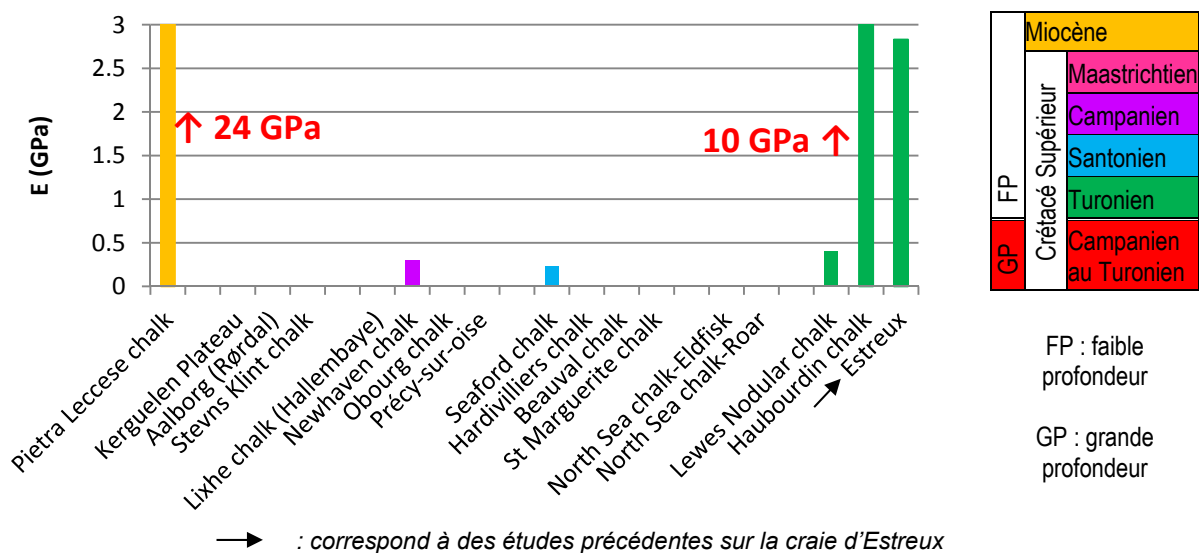


Figure I.22 : Module de Young de diverses craies suivant l'âge géologique (voir Tableau I.2)

La présence de l'eau comme fluide saturant provoque une perte de résistance, comme une diminution du module de Young et de l'angle de frottement, en corrélation avec une augmentation de la saturation (Taibi et al. 2009, Talesnick et Shehadeh 2007, Talesnick et al. 2001, Brignoli et al. 1994) et la réactivité de l'eau (Duperret et al. 2005). D'ailleurs, pour la craie d'Estreux, le rapport entre résistances à sec et en saturé est relativement constant et de l'ordre de 2 (Nguyen 2009). Ceci n'est vrai que lorsque le fluide est mouillant. Ce n'est pas le cas pour les hydrocarbures (Risnes et al. 2003) qui ne modifient que très peu la résistance du matériau. La variation volumique du matériau a tendance à changer en fonction du confinement appliqué : le matériau gonfle ou s'effondre suivant que le confinement est important.

L'apport d'eau tend à changer la courbure des ménisques capillaires et par conséquent la force de traction capillaire participant à la cohésion de la craie. C'est en partie ce phénomène qui explique la perte de résistance.

En traction, la craie possède une résistance non nulle mais très faible, et le plus souvent inférieure à 1 MPa (Schroeder 2002).

I.4.2. Comportement différé

L'effet du temps se traduit dans les roches de deux façons, à savoir :

- le fluage correspondant à la partie visqueuse dépendant lui du chargement ;
- le vieillissement⁹ correspondant à une évolution des propriétés d'un matériau en fonction du temps suite à une action anthropique.

Nous ne discuterons dans cette partie que du premier cas, le deuxième est abordé plus loin (voir § I.5).

Le fluage est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée d'un matériau soumis à une contrainte constante, la plupart du temps inférieure à sa limite d'élasticité (voire au delà mais toujours inférieure à sa résistance à court terme) et ce, pendant un certain laps de temps. Le fluage se développe selon deux types de chargement : l'un hydrique et l'autre mécanique. La viscosité se traduit par sa capacité à dissiper de l'énergie. Elle s'ajoute donc aux déformations dites instantanées. Elle dépend, entre autres, de la forme des particules, de la granulométrie, de la cimentation et de la résistance des particules constitutives.

En plus des aspects plastiques (comportement court terme), la craie peut présenter un fluage non négligeable. Le déviateur appliqué influence considérablement le type de fluage rencontré. Dahou et al. 1995 ont étudié le fluage d'une craie du Nord de la France (Figure I.23). Les essais suivent des chemins isotropes et déviatoriques. Les auteurs avaient montré qu'en raison des déviateurs appliqués élevés (le confinement

⁹ Le vieillissement est l'évolution des propriétés de la roche en fonction du temps suite à une activité d'origine anthropique (ex : creusement de carrière). Lorsque l'activité est d'origine naturelle, on parle d'altération. Il fait l'objet du Chapitre IV.

était au minimum de 10 MPa), il n'y a pas de fluage tertiaire et 90 % des déformations se produisent dans les premières 24 h de l'essai.

Maranini et Brignoli 1999 ont effectués des essais sur la craie de Pietra Leccese (Miocène, Tertiaire) – dont le comportement est gouverné par sa grande porosité – à différents confinements et à différents paliers. Il est à noter que les auteurs se placent ici dans le cadre d'une roche réservoir. Plusieurs conclusions ressortent de ces résultats expérimentaux :

- les principaux mécanismes de déformation sont la propagation de fissures pour un mode de rupture fragile - à très faible confinement - et le « pore-collapse » à très grand confinement ou en condition hydrostatique. Le fluage réduit le domaine correspondant à la rupture fragile et abaisse son seuil en faveur d'une plastification. La dilatance ne peut cependant pas être considérée comme un indicateur d'endommagement contrairement à la plupart des autres roches ;
- le principal effet du fluage sur le comportement mécanique est l'abaissement du seuil limite d'élasticité dû au « pore-collapse » dans des conditions réservoir ;
- la rupture et la plastification sont dépendantes du chemin de sollicitation : pour un palier final à atteindre, une craie ayant suivi un chemin de sollicitation comportant plusieurs niveaux de contrainte atteindra la rupture avec des déformations plus importantes que si le chemin de sollicitation ne comportait qu'un niveau de contrainte (correspondant au palier final à atteindre). Cependant, la rupture est atteinte beaucoup plus tard ;
- le module de Young E et le module de compressibilité K dans le cas d'un essai de fluage sont plus faibles par rapport à leurs valeurs obtenues dans le cas des autres chemins de sollicitation.

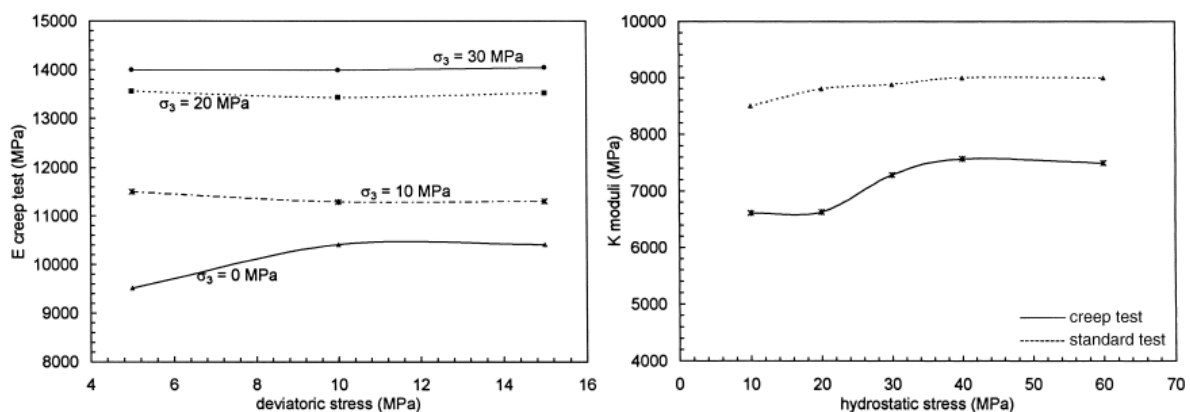


Figure 1.23 : Évolution des modules de Young E et de compressibilité K en fonction des conditions expérimentales d'un essai de fluage triaxial (σ_3 : confinement) ou hydrostatique (Maranini et Brignoli 1999)

De plus, Xie 2005 montre pour la craie de Lixhe que sous un confinement très élevé le fluage tertiaire n'a pas d'occurrence, à défaut du cas où un faible confinement est appliqué. L'observation d'un fluage tertiaire pour la craie dépend donc entièrement

de l'état de contrainte du matériau. Etant donné que le fluage correspond au côté visqueux du comportement, la viscosité de la craie fut l'objet de nombreuses études. La part visqueuse du comportement mécanique peut être appréhendée en effectuant des essais à diverses vitesses de chargement (Nguyen 2009, Hickman et Gutierrez 2007, Priol 2005, De Gennaro et al. 2003, Schroeder 2002). Il en était conclu :

- le seuil de « pore-collapse » est plus élevé lorsque le chargement est dit rapide. Les courbes contrainte-déformation des essais non cyclés suivent des chemins parallèles, même si une certaine dispersion est à noter ;
- pour deux essais dits lents, un cyclé l'autre non, le seuil de « pore-collapse » reste inchangé mais les courbes contrainte-déformation – quasi-confondues en début d'essai – divergent au fur et à mesure que l'essai se poursuit.

La relation seuil de « pore-collapse »-vitesse de chargement est nette.

Quant à l'effet de l'eau sur le phénomène de fluage, les différents auteurs s'accordent à dire que le fluage augmente avec la présence d'eau (Megawati et al. 2013, Andersen et al. 2012, Madland et al. 2011, Xie et Shao 2006, Xie 2005).

I.5. VIEILLISSEMENT

I.5.1. Avant-propos

Le vieillissement d'une roche est le phénomène d'évolution lente et irréversible au cours du temps de ses propriétés physiques et mécaniques suite à une action anthropique. Il correspond donc à l'altération de la dite roche en milieu anthropisé.

Dans le cas des carrières souterraines, le terme vieillissement concerne l'évolution de leurs caractéristiques en fonction du temps après exploitation. Dès lors, suivant les effets de cette modification dans les roches, on parlera de vieillissement positif dans le cas d'une amélioration des propriétés de la roche – certes peu fréquent mais très bien étudié pour le béton – et d'un vieillissement négatif dans le cas d'une dégradation de celles-ci (beaucoup plus fréquent). L'altération correspond à un phénomène similaire mais dans un cadre naturel.

I.5.2. Notion d'altération

I.5.2.1. Définition

Par définition, l'altération correspond à un changement dans la nature d'un objet. Dans le cas des roches, il s'agit de la « modification des propriétés physico-chimiques des minéraux et donc des roches, par les agents atmosphériques, par les eaux souterraines et les eaux thermales (altération hydrothermale) » (Foucault et Raoult 2010).

En d'autres termes, il s'agit d'une évolution naturelle, dont le résultat la plupart du temps est une dégradation de la roche initiale, rendant celle-ci moins cohérente et

facilitant sa désintégration (ex : arènes granitiques) (Masuda 2001, Gupta et Rao 2000). Elle dépend en particulier du climat, de la température des eaux, de la nature des roches et de leur degré de fracturation.

De manière globale, l'altération correspond à la recherche d'un nouvel équilibre physico-chimique thermodynamiquement stable. Ce phénomène a tendance à régresser et même à disparaître dès lors que l'on s'enfonce de plus en plus dans le massif rocheux.

I.5.2.2. Facteurs et manifestations dans le cas de la craie

Les facteurs favorisant l'altération sont multiples et la part de chacun dépend la plupart du temps du contexte dans lequel la roche évolue (Filliat 1981). On peut cependant citer : (a) la nature pétrographique de la roche ; (b) le degré de fracturation du massif rocheux ; (c) le mode de pénétration des eaux (ainsi que sa chimie) à l'intérieur du massif rocheux (fractures, porosité, température ambiante, ...) ; (d) l'activité biologique ; (e) les conditions climatiques et le temps passé au contact de ces agents.

L'importance du premier facteur susmentionné dépend en majeure partie de l'altérabilité des minéraux constituant la roche. La calcite est peu altérable de par la proximité, d'un point de vue thermodynamique, des états d'équilibre de formation et d'évolution actuelle. Les minéraux argileux sont la plupart du temps très altérables.

Le deuxième facteur à l'échelle du massif est d'une importance non négligeable puisqu'il conditionne la circulation des eaux (indépendamment de la porosité intrinsèque ou la nature de la roche). Il est d'autant plus important si l'on considère l'état d'ouverture des fissures ainsi que leur fréquence au sein du massif. En toute logique, la craie devrait présenter un état de fracturation plus important aux abords des accidents géologiques.

Le troisième facteur dépend en grande partie du second. Si la présence d'eau est avérée, généralement plus le milieu est fracturé et/ou plus les fissures sont ouvertes, plus l'eau aura de la facilité à circuler. Dans le cas des carrières souterraines de craie, il s'agit plus vraisemblablement de circulation d'eaux superficielles. Ces eaux peuvent provoquer, en période d'hiver l'éclatement de la roche, et une modification de la composition minéralogique au contact eau/roche si l'eau n'est pas en équilibre avec la roche qu'elle traverse.

Le quatrième facteur dépend en partie des conditions hydriques, du climat et de la possibilité de colonisation du milieu ou de transport vers ce milieu, d'agents biologiques (champignons, bactéries, ...).

Du cinquième facteur dépend souvent le troisième, notamment avec l'alternance de période humide à sèche dans les milieux tempérés.

Dans le cas des roches sédimentaires, et en particulier dans le cas de la craie, le principal agent d'altération reste l'eau. L'altération des roches se manifeste le plus souvent par la formation de vides (phénomène de dissolution – voir § I.3.2.3), de fractures et de dépôts témoins de réaction chimique (Oyama et Chigira 2000, Chigira et Oyama 2000) avec ou sans néoformation de minéraux (Robinson et Woodun 2008, Gupta et Rao 2000, Chene et al. 1999). La circulation des eaux s'effectue en très grande majorité par les fissures ouvertes, l'eau non équilibrée élargit ces fissures par dissolution, aggravant ainsi le phénomène. Dans le Bassin Parisien, on distingue généralement deux types de réseau de fissures dans la craie : celles à l'échelle du massif (diaclasses) et les microfissures. À l'affleurement, la craie présente des perméabilités très élevées – donc une possibilité de transport rapide.

Dans le cas où la craie (ou les terrains sus-jacents) présente une part non négligeable de minéraux argileux, ceux-ci sont entraînés par les eaux en amont et peuvent, du fait de leur insolubilité, boucher les fissures et ralentir l'expansion du phénomène de dissolution plus en profondeur. Le phénomène est d'autant plus accentué dès lors que les grains constitutifs de la roche présentent des fractures les rendant « vulnérables » aux agents d'altération.

I.5.3. Type de désordres dans les carrières souterraines de craie

À une échelle plus vaste, on ne s'intéressera dans la suite qu'aux données concernant les carrières de craie du Bassin Parisien.

I.5.3.1. Types d'exploitation

Le principal mode d'exploitation des carrières de craie en souterrain est l'exploitation par chambres et piliers (comme les carrières de Meudon), généralement sur plusieurs étages. Le deuxième mode d'exploitation rencontré est celui par chambres isolées (comme le niveau bas des carrières des Montalets) ou sous la forme de catiches (Nord de la France et Picardie). Le toit peut être soit en forme de voute (Figure I.1), soit horizontal.

Les galeries forment un réseau plus ou moins orthogonal laissant subsister des piliers dans la masse, dont les bords peuvent être francs ou non. Les dimensions varient suivant la hauteur d'exploitation de la carrière : on retrouve par exemple à Meudon des piliers larges et une hauteur d'exploitation avoisinant la dizaine de mètres, et ailleurs comme à Saint-Martin-le-Nœud (Gombert 2010) des piliers peu larges mais une hauteur d'exploitation beaucoup plus faible. Dans le cas d'une exploitation à plusieurs niveaux (ex : Meudon), les piliers ne sont pas toujours correctement superposés. L'exploitant était aussi contraint par les accidents rencontrés sur son chemin (failles, diaclasses,...) et les aspects juridiques.

Le devenir du matériau extrait dépendait de sa couleur, du banc d'extraction et de sa « tenue ». Une même carrière pouvait produire de la craie aussi bien pour les fours à chaux que pour la construction de monuments ou de statues.

I.5.3.2. Type de dégradation

Le cas des carrières souterraines de craie est particulier. Il y a peu de désordres de type fontis localisés, ou bien s'ils existent, ils sont généralement de petite ampleur et la cloche évolue très peu de par la nature des terrains sus-jacents (argileux ou plus résistants généralement). Les effondrements sont, malheureusement, généralisés et de plus grande ampleur : ils peuvent se produire sur plusieurs hectares. La Figure I.24 présente des photographies de ces deux types de désordre.

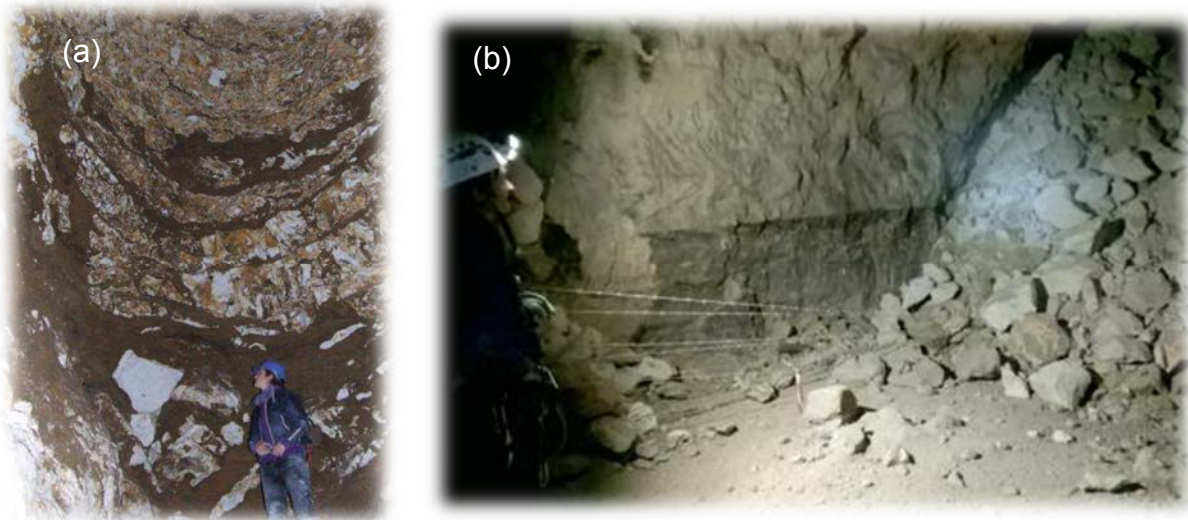


Figure I.24 : Photographies de deux types de désordre : (a) vue d'un fontis (carrière de Saint-Martin-le-Nœud, France) ; (b) vue au sein de la carrière d'un effondrement généralisé (carrière de la Malogne, Belgique)

Parmi les effondrements généralisés, les catastrophes d'Issy-les-Moulineaux et de Clamart en 1961 ont provoqué la disparition complète de plusieurs quartiers. Pour ces deux catastrophes, la géologie a sans doute joué un rôle important : ces deux communes se situent à l'axe de l'anticlinal de Meudon au sud de Paris. La charnière du pli est une zone comportant de multiples fractures et leurs deux directions générales étaient en mesure de favoriser le glissement de blocs sur plusieurs hectares, amenant un déséquilibre des piliers et toit sur plusieurs niveaux d'exploitation, puis provoquant une réaction en chaîne destructrice.

De même, à Château-Landon, trois carrières sur quatre se sont effondrées suite à la crue de 1910.

I.5.4. Quid du vieillissement de la craie ?

Le phénomène de vieillissement a fait l'objet de plusieurs études sur des matériaux et carrières dites « sensibles ». La dégradation des monuments et ouvrages d'arts par des agents extérieurs ont d'ailleurs été très largement étudiés : plâtre (Pachon-Rodriguez 2011), Château de Chambord (Beck 2006), remblais (Ramana et Gogte 1982), ruines archéologiques (Jeannette 2000), béton (travaux du CEREMA, Roziere 2007, ...), matériaux polymères (Fayolle et Verdu 2005), ...

Le vieillissement d'autres matériaux a également été étudié : tuffeau, calcaires, grès (Gupta et Rao 2000, Chigira et Oyama 2000, Chene et al. 1999). Pour les carrières souterraines, on pensera notamment aux différentes exploitations de gypse (Auvray et al. 2004, Auvray 2003) et au minerai de fer (Dagallier et al. 2002, Grgic 2001, Grgic et al. 2001).

Certaines de ces carrières se trouvent au-dessus de zones fortement urbanisées, et le pompage des nappes en a fortement augmenté le risque de dissolution (le gypse notamment, en Région Parisienne).

Malheureusement, il n'existe dans la littérature que très peu d'études relatives au possible vieillissement de la craie dans le cadre des carrières souterraines. Par conséquent la discussion suivante n'a pour but que d'exposer les phénomènes potentiels accompagnant ce possible vieillissement de la craie.

La craie est très sensible aux processus physiques, chimiques et biologiques liés à l'altération, donc possiblement au vieillissement (Sorgi et Auvray 2005, cf § I.5.2.2), et ce d'autant plus qu'elle possède un réseau poreux peu tortueux important (§ I.3.1).

- *Processus physiques*

Les processus physiques regroupent les processus thermiques, hydriques et mécaniques. Les processus thermiques – seuls – ont une influence faible (Nadah et al. 2013, Brignoli et al. 1994). L'eau peut avoir à la fois un effet négatif comme un effet positif sur l'évolution de la craie en milieu souterrain – indépendamment de ses actions chimiques qui seront abordées plus loin. En quantité faible, hygrométrie faible, elle participe à la « tenue » de la roche alors qu'en quantité trop importante, elle participe à son effondrement (Nguyen 2009, Nguyen et al. 2008).

Les cycles d'imbibition/séchage dans les carrières souterraines dus au climat, et les propriétés d'adsorption de la craie (voir § I.3.2.1) font que le massif autour des piliers, toit et mur subit de manière cyclique une variation importante de sa saturation sur un temps court pouvant aller de quelques mois à une année. Il a été vu dans une étude ultérieure que pour le pilier de la carrière d'Estreux, le front de saturation est orienté perpendiculairement à la paroi de pilier (Sorgi et Auvray 2005) et permet le développement de contraintes liées à la pression capillaire. De ce fait, d'un point de vue physique, les deux types d'effets – positif et négatif – de l'eau devraient se succéder de manière cyclique dans les zones où il y a un battement de la nappe par exemple (phénomènes de changement du rayon de courbure des ménisques capillaires, Risnes et al. 2005, Risnes et al. 2003). D'un point de vue mécanique, les variations d'hygrométrie entraînent des variations de volume (Delage et al. 1996, Josa et al. 1987) et le fluage peut se développer également suivant un chargement hydrique. Une multiplication des cycles d'imbibition/séchage augmenterait le fluage de la craie (d'après § I.4.2) mais devrait *a priori* « retarder » sa rupture. Le vieillissement pourrait donc avoir un aspect positif quant au comportement visqueux

(Tatsuoka 2006). Dans le cas d'une zone fracturée, le fluide participe à une réorganisation de l'espace poreux – par transport de particules – et entraîne des déformations importantes au niveau des fractures (Gaviglio et al. 2009, Gutierrez et al. 2000).

- *Processus chimiques et biologiques*

Sans généraliser, il a été vu sur la craie d'Estreux que des microorganismes peuvent être responsables d'une dégradation de la craie (cela s'est vu aussi sur le minerai de fer). Outre l'utilisation comme support nutritif, cette flore peut dégager des substances pouvant dégrader la craie : par exemple des bactéries sulfato-réductrices présentes dans la craie d'Estreux produisent du sulfure d'hydrogène (H₂S) (Nguyen 2009). Ce type de produit – acide – pourrait être en mesure de favoriser le phénomène de dissolution.

On regroupe dans les processus chimiques les phénomènes d'oxydation et de dissolution/recristallisation (voir § 1.3.2.3). Le premier n'a qu'une influence moyenne du fait de la pauvreté de la craie en minéraux oxydables, contrairement au second, surtout en présence d'eau. Rappelons que la dissolution de la calcite est affectée par le pH, les impuretés chimiques et la composition chimique de l'eau et de l'état de contrainte dans le massif. Ajoutons qu'elle s'accompagne de recristallisation aux endroits où l'énergie est plus faible lorsque la craie évolue en milieu oxydant. Les deux processus antagonistes – au regard des cycles d'imbibition/séchage avec une grande variation d'hygrométrie – devraient donc se succéder et voir leur résultat se manifester de manière rapide (Sorgi et De Gennaro 2007).

En conclusion de cette partie et tenant compte du fait que le vieillissement de la craie n'a pas ou trop peu été étudié, plusieurs pistes de réflexion peuvent être émises. Le vieillissement ne pourrait être défini qu'en reliant de manière intime les processus physiques et chimiques d'altération de la craie tout en tenant compte du milieu dans lequel elle évolue. Les processus physiques (hydriques et mécaniques) seuls auraient tendance à avoir un impact plutôt négatif sur l'évolution de la craie. Cependant, en prenant en compte les phénomènes chimiques évoqués plus haut, dépendant entièrement des propriétés intrinsèques de la roche, ces processus peuvent être en mesure d'avoir un impact positif sur l'évolution de la craie.

I.6. CONCLUSION

Les interactions eau/craie et la microstructure conditionnent de façon considérable la réponse de la craie lorsqu'elle est soumise à une sollicitation mécanique.

Le comportement purement mécanique de la craie est gouverné par ses propriétés intrinsèques, à savoir sa composition minéralogique, sa très grande porosité (amenant à un effondrement plastique des pores) et sa faible cohésion. Il est de plus influencé au niveau microscopique par les phénomènes de capillarité, d'adsorption, de rupture de liaisons électrostatiques, des interactions physico-chimiques et la

dissolution-recristallisation. À court terme et si la craie est saturée, l'eau aurait tendance à avoir une influence négative sur les propriétés mécaniques (baisse des modules de Young et de la contrainte à la rupture, baisse de la limite élastique) mais serait en mesure de retarder la rupture sur le long terme.

On peut faire ressortir de cette étude bibliographique, une multitude de mécanismes et de phénomènes jouant simultanément, mais dont la combinaison serait en mesure de donner des résultats considérés inattendus dans la plupart des roches et font de la craie un matériau unique.

Afin de couvrir la diversité mise en évidence par ce chapitre, nous avons choisi d'étudier trois craies d'origine et de composition distinctes. Elles proviennent des carrières souterraines d'Estreux (à côté de Valenciennes, Nord), de Saint-Martin-le-Nœud (à côté de Beauvais, Oise) et de Château-Landon (près de Nemours, Seine-et-Marne). La première est creusée dans une craie verte glauconieuse datant du Turonien, la deuxième dans une craie dolomitique du Santonien et la dernière dans une craie pure du Campanien. Chacune de ces carrières abandonnées présente l'avantage d'être surveillée et d'être située à proximité d'une nappe.

Chapitre II : Présentation des trois carrières de craie étudiées

Résumé :

Ce chapitre a pour objectif de décrire les contextes hydrologiques, géologiques locaux et régionaux de trois carrières souterraines de craie étudiées.

Ces carrières ont été choisies pour couvrir une certaine diversité de la craie. Elles permettent ainsi de faire un tour d'horizon, bien sûr non-exhaustif, des différentes manifestations de l'interaction eau-craie mais également de faire apparaître les conditions de cette manifestation en fonction de la typologie de la craie et de leurs configurations d'exploitation.

Mots-clés : *craie, contexte géologique, contexte hydrologique, carrière souterraine, chambres et piliers, remontée de nappe*

II.1. INTRODUCTION

Le chapitre précédent proposait une synthèse sur l'aspect phénoménologique de la craie et il en était ressorti (entre autres) que toutes ses propriétés mécaniques dépendaient en partie de son environnement de dépôt, de son histoire géologique et de l'environnement dans lequel elle évolue.

Afin de répondre au mieux aux problématiques soulevées dans le Chapitre I, trois carrières souterraines (Figure II.1) ont été retenues pour les expérimentations en laboratoire et *in situ*. Ces trois exploitations, pour certaines suivies depuis longtemps par l'INERIS, appartiennent au même ensemble géologique global, le Bassin Parisien, et ont été creusées dans les formations du Crétacé Supérieur (Turonien, Santonien et Campanien). Elles n'appartiennent pas au même ensemble géographique mais présentent toutefois des différences structurales représentatives de la diversité des dépôts de craie. Leur suivi s'inscrit dans le contexte plus global de l'étude du réchauffement climatique.

Ces trois carrières se caractérisent en outre par un contexte hydrogéologique particulier ainsi qu'un historique qu'il est judicieux de ne pas négliger.



Figure II.1 : Localisation des trois carrières dans le contexte géologique global du Bassin Parisien (crédit : GéoPortail)

Les trois carrières souterraines présentent un intérêt certain pour l'étude des interactions eau-roche car chacune est en contact direct avec la nappe de la craie :

- la carrière d'Estreux n'est que peu fréquemment ennoyée (et dans ce cas les pieds de piliers baignent dans l'eau). Elle est donc particulièrement intéressante dans l'appréhension du comportement de carrières souterraines se trouvant dans le même cas ;
- la carrière de Saint-Martin-le-Nœud présente des lacs souterrains qui sont pérennes depuis au moins la fin du XIX^e siècle et leur niveau d'eau fluctue de 1 à 2 m suivant les années (suivi depuis 1899 par Mary et Mary 1907). De plus, l'eau qui percole au toit de la carrière témoigne de l'arrivée directe des eaux de percolation et de la situation de la carrière à l'interface entre la nappe et la zone non saturée ;
- la carrière de Château-Landon n'a, *a priori*, jamais été ennoyée mais des carrières proches ont subi des inondations exceptionnelles qui se sont traduites par des accidents assez impressionnants. Il est donc particulièrement intéressant de l'examiner pour comparer avec ces autres carrières de craie ayant des propriétés similaires.

Chaque carrière de craie sera présentée dans l'ordre stratigraphique (du Turonien au Campanien). Un bref historique de l'exploitation de ces craies sera placé en parallèle de la description des contextes géologique et hydrologique, car les différences de durée d'exploitation peuvent induire, comme cela a été démontré, entre autres pour le gypse ou le minerai de fer, et comme cela sera montré dans un chapitre ultérieur, des différences d'un point de vue structural ou mécanique.

II.2. CARRIÈRE D'ESTREUX

II.2.1. Données géographiques et contexte historique

La carrière dite d'Estreux est située sur la commune de Saint-Saulve en bordure de l'autoroute A2, reliant Paris à Bruxelles, dans le département du Nord (59) à 10 km à l'Est de Valenciennes (Figure II.2a). Sa superficie d'exploitation est d'environ 10 ha. Elle fut creusée principalement pour la fabrication de pierre de taille (« bonne pierre » de Valenciennes) à la fin du XVIII^e siècle et est abandonnée depuis le XIX^e siècle aux alentours de 1870 (Bivert 1988).

On se trouve ici à 60 m d'altitude sur un plateau – profil tabulaire – dominant la rive droite de l'Escaut. Le secteur est parcouru de vallées sèches à écoulement temporaire dont le fond est situé vers 45 m NGF.

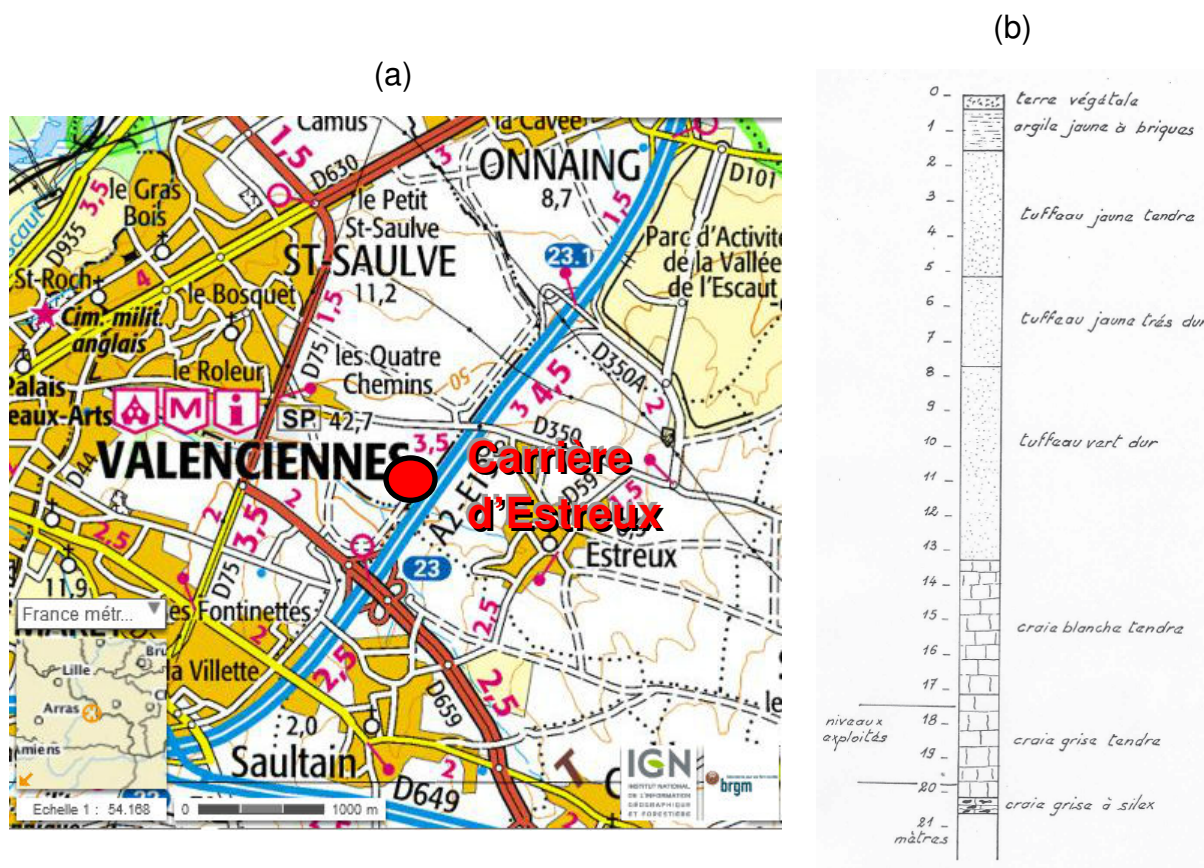


Figure II.2 : (a) Localisation (Crédit : GéoPortail) et (b) coupe stratigraphique des terrains de la carrière d'Estreux (Nguyen 2009, Raffoux et Ervel 1980)

II.2.2. Contexte géologique et hydrologique

La craie exploitée de la carrière d'Estreux est une craie gris-verte glauconieuse. Selon la notice de la carte géologique au 1/50 000 n°28 de Valenciennes (XXVI-6) et Ghoreychi 1983, cette craie correspond au faciès datant du Turonien supérieur. Les terrains sus-jacents (Figure II.2b) sont composés de craie blanche (4 m d'épaisseur) datant du Sénonien (Coniacien/Santonien) et recouverte de tuffeau (11 m d'épaisseur) et d'épais limons quaternaires (environ 2 m d'épaisseur). La couche de craie exploitée, repose quant à elle sur de la craie grise à silex. La carrière subit des fluctuations du niveau de la nappe phréatique – niveau généralement entre 22 et 25 m, entre 18 et 27 m aux extrêmes – conduisant à son ennoyage de façon plus ou moins périodique. La nappe située à environ 3 ou 4 m de profondeur sous la carrière remonte suite à des précipitations importantes. Sur des bases statistiques, l'ennoyage de la carrière sous 0.5 à 2.5 m intervient tous les 6 à 8 ans (Gombert 2012). Les dernières hautes eaux se sont produites entre 2006 et 2010, ce qui amènerait le prochain ennoyage aux alentours des années 2015-2017 (voir Figure II.3).

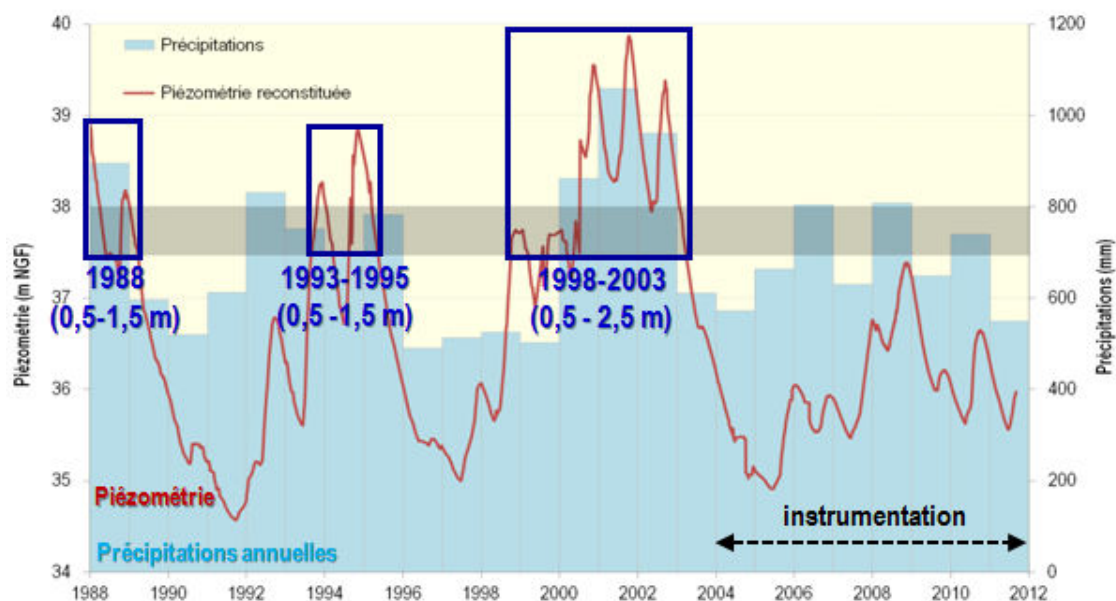


Figure II.3 : Évolution du niveau d'envoyage de la carrière d'Estreux (Gombert 2014)

Selon Gombert 2014, la hauteur de frange capillaire est comprise entre 4 et 16 m, soit 10 m en moyenne au-dessus du niveau de la nappe. La carrière d'Estreux se trouve donc toujours dans cette frange et il est probable que l'amplitude de variation du degré de saturation soit très importante.

II.2.3. Mode d'exploitation et désordres

Il s'agit d'une carrière de craie, souterraine, située entre 17 et 20 m de profondeur, exploitée selon la méthode des « chambres et piliers ». Un plan de cette carrière est donné sur la Figure II.4.

Cette méthode d'exploitation, la plus généralement utilisée et la plus ancienne, consiste à creuser un réseau de galeries à partir des puits d'accès en laissant de la masse de roche sous forme de piliers suffisamment épais pour soutenir le toit de la carrière et ainsi éviter les phénomènes d'effondrements généralisés susceptibles de survenir au cours de l'exploitation. Une dizaine de puits, pour la plupart remblayés, ont été répertoriés sur l'ensemble de la carrière. La Figure II.5 présente des vues de la carrière d'Estreux.

La carrière est composée de galeries qui devaient être à l'origine de 2 à 3 m de hauteur, de 2 à 3 m de largeur et de 20 m de long. Les piliers mesurent entre 1.5 et 4.5 m de côté. Le réseau de galeries est assez régulier et le taux de défrètement de cette carrière est de l'ordre de 78 %. Compte tenu de la forte épaisseur des déchets de taille laissés en place, l'ouverture des galeries est souvent réduite à moins de 1,50 m.

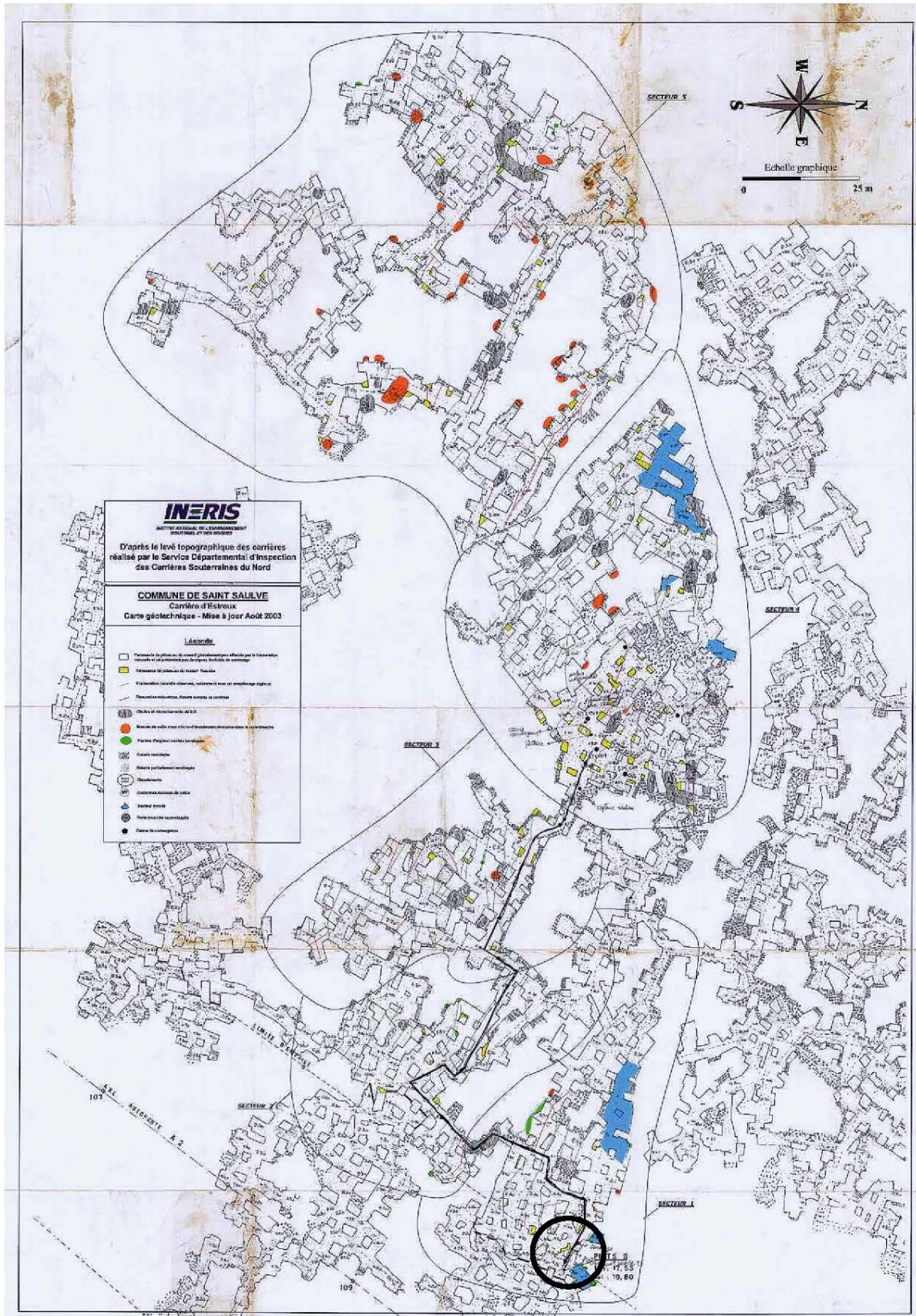


Figure II.4 : Plan d'exploitation de la carrière d'Estreux (Crédit : INERIS). Zone de prélèvement indiquée par un rond noir



Figure II.5 : Vues sur les galeries et piliers de la carrière d'Estreux
(Crédit : Vincent DUSEIGNE - <http://tchorski.morkitu.org>)

La zone de carrière suivie (l'exploitation connue est nettement plus étendue) est délimitée en cinq secteurs (voir Figure II.4) de superficie variable et les différents types de désordres rencontrés y sont répartis comme suit :

- de la fissuration due à des sollicitations mécaniques et de la fracturation naturelle (remplies d'argile la plupart du temps) sont rencontrées dans tous les secteurs. Elles sont globalement orientées dans la direction NW-SE sauf dans le secteur 5 où une partie de ces fissures/fractures sont orientées dans la direction NEE-SWW ;
- des chutes de blocs et décrochements de toit sont rencontrés principalement dans les secteurs 4 et 5. Ils prennent place (comme pour la plupart des carrières souterraines) entre plusieurs piliers. On en trouve également quelques-uns dans les secteurs 1, 2 et 3 ;
- des montées de voûte avec cloches d'éboulement (fontis) se retrouvent pour la plupart dans les secteurs 3, 4 et 5. On les trouve pour certaines en fond de galerie au niveau des fronts de masse ;
- la fissuration des parements de pilier se retrouve essentiellement dans le secteur 4, à savoir celui d'extension la plus large et possédant les piliers de plus petits périmètres. C'est d'ailleurs cette zone qui a été instrumentée.

II.3. CARRIÈRE DE SAINT-MARTIN-LE-NŒUD

II.3.1. Données géographiques et contexte historique

L'accès à carrière de Saint-Martin-le-Nœud est situé sur la commune du même nom (Figure II.6) à 5 km au Sud-Ouest de Beauvais dans l'Oise (60). L'exploitation s'étend en partie sur la commune d'Aux Marais sur 1 200 m de long et représente environ 20 ha le long du plateau en suivant le pendage naturel des couches géologiques vers le Nord-Est. La cavité a été creusée au sein du dôme topographique de Saint-Martin-le-Nœud (155 à 170 m NGF) qui surplombe la vallée d'Aux Marais (65 m NGF).

L'exploitation de la carrière a sans doute commencé au XII^e siècle et s'est terminée au XIX^e siècle, 1830 exactement en raison d'un arrêté royal communiqué suite à

l'effondrement de l'entrée principale. La pierre à bâtir extraite – de la craie à Micraster – a servi notamment à bâtir la cathédrale de Beauvais et s'est étendue au fur et à mesure pour la restauration des fortifications, églises et autres édifices (Gombert 2010). L'entrée de cette carrière souterraine est protégée par le Conservatoire des Sites Naturels de Picardie car elle abrite divers espèces de chauves-souris lors de la période hivernale. Elle fut classée Natura2000 en 2013.

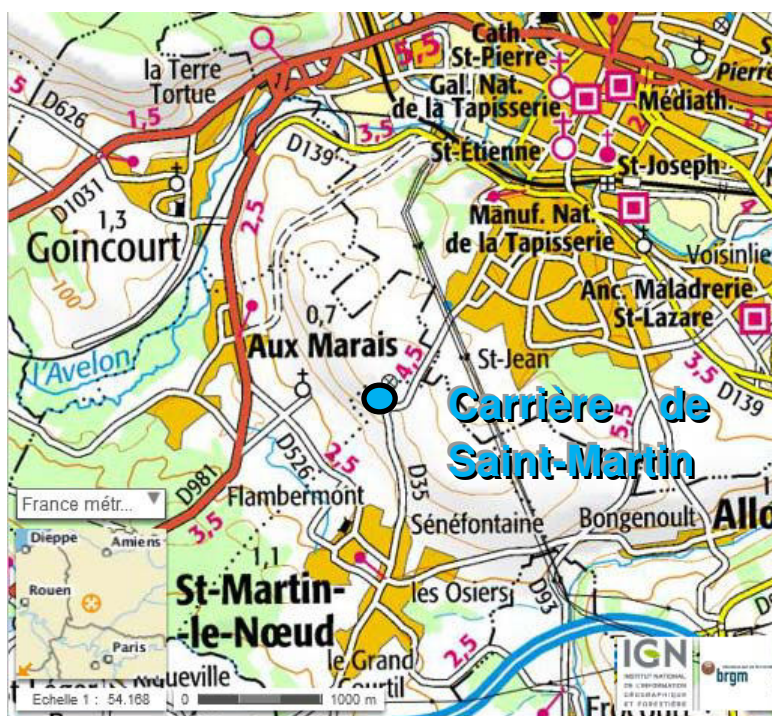


Figure II.6 : Localisation de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (Crédit : GéoPortail)

II.3.2. Contexte géologique et hydrologique

La carrière de Saint-Martin-le-Nœud appartient à l'ensemble géologique correspondant à l'anticlinal de Bray (colonne stratigraphique en Figure II.7) et se situe sur son flanc Nord-Est. D'après la notice de la carte géologique au 1/50 000 n°102 de Beauvais (XXII-11), le flanc Sud-Ouest de cet anticlinal dissymétrique possède un pendage de l'ordre de 10° alors que son flanc Nord-Est présente des pendages allant jusqu'à 50° (exceptionnel – non loin de l'axe du pli). En regard de l'éloignement des terrains du Crétacé Supérieur de l'axe de l'anticlinal, le pendage se radoucit au niveau de ces formations géologiques pour n'atteindre que des valeurs comprises entre 2° et 10° par endroits puis présenter un profil tabulaire au niveau de Beauvais.

D'après le site Infoterre (GéoPortail), le sondage 01023X0179/PIC063 situé à 500 m au Nord-Est de l'entrée de la cavité donne les informations suivantes sur les terrains sus-jacents : la carrière est surplombée par environ 20 à 25 m de craie blanche à Micraster avec des silex et argiles en partie supérieure et jusqu'à 4.60 m de limons et d'argiles à silex (étayé par Barhoum 2014). Les diaclases sont souvent soulignées par des plaques silicifiées de même nature que le silex en place.

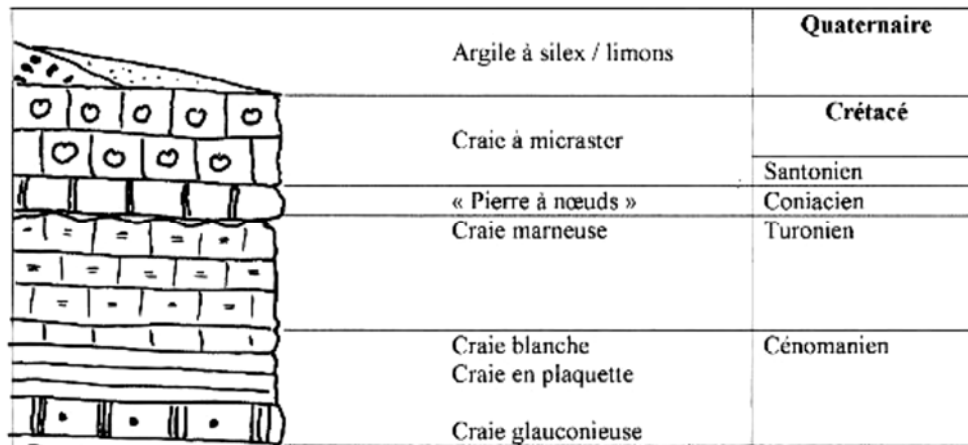


Figure II.7: Colonne stratigraphique des principaux affleurements depuis la base du Crétacé Supérieur dans le Pays de Bray (Crédit : BRGM)

Du fait de cette configuration, la carrière recoupe le niveau de la nappe de la craie dans sa partie Nord-Est (Figure II.8). De ce fait, la nappe affleure sous forme de 15 à 24 lacs souterrains centenaires tout le long de la carrière. Ces lacs sont pérennes depuis au moins la fin du XIX^e siècle et leur niveau d'eau varie de 1 à 2 m depuis 1899 (Mary et Mary 1907). Néanmoins, l'eau qui suinte en toit de carrière témoigne de l'arrivée des eaux depuis la surface (présence de stalactites et stalagmites). La carrière se situe donc en pleine interface entre la nappe et la zone non saturée. La carrière est recoupée par deux grandes familles de fractures orientées NW-SE et NE-SW conséquentes de la compression horizontale caractéristique du Pays de Bray. Il est à noter cependant que les zones de percolation au toit ne sont pas similaires ni en temps ni en espace (Barhoum 2014) : la percolation est présente toute l'année pour certains lacs alors que d'autres ne sont pas approvisionnés pendant de nombreux mois (dans la partie Sud-Est notamment). Le niveau des lacs a tendance à baisser en raison des épisodes de sécheresse que traverse la région depuis plusieurs années.

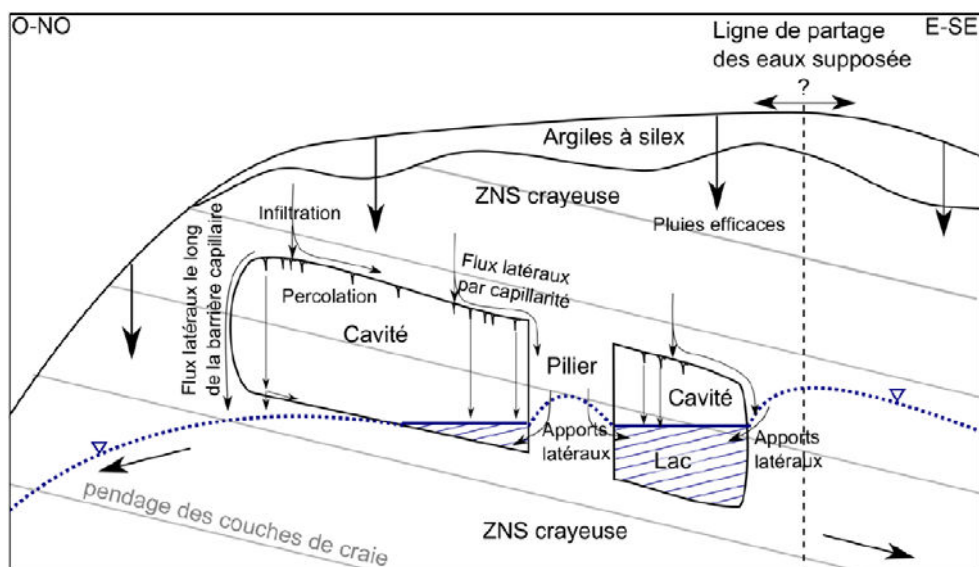


Figure II.8 : Schéma hydrogéologique de la carrière de Saint-Martin-le-Noëud (Barhoum 2014)

II.3.3. Mode d'exploitation et désordres

La carrière de Saint-Martin-le-Nœud a été exploitée selon la méthode des chambres et piliers (Mary et Mary 1907) et se situe, d'après l'INERIS, à une profondeur comprise entre 9 (près de l'ancienne entrée) et 30 m. La carrière débute dans la « Pierre à Nœuds » (Coniacien, Crétacé Supérieur) mais se retrouve dans la craie à Micraster (Santonien, Crétacé Supérieur), étage pour lequel la craie est exploitée. Elle s'enfonce jusqu'à la limite du Coniacien-Turonien.

Le plan des galeries et quelques vues de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (Figure II.9 et Figure II.10) témoignent d'une géométrie variable entre petites galeries (Rue Georges, Allée des Inocérames, ...) et grandes chambres (Place des Nations, Grande Champignonnière, ...). La largeur des galeries atteint au minimum 1.60 m et leur hauteur varie de 1.70 à 3 m. La taille/forme des piliers, outre les gros étaux de masse, semble plutôt irrégulière. Le taux de défrètement est estimé entre 50.4 % et 66.5 % (Gombert 2010). Les pieds de piliers sont pour la plupart recouverts par des remblais plus ou moins réguliers. Certains endroits n'en présentent pas.

En termes de désordres, la carrière de Saint-Martin-le-Nœud est marquée par la présence de quelques cheminées de fontis assez localisées dans la carrière et de nombreux toits effondrés surtout dans les grandes salles associés à des piliers fragilisés par des fractures. Le fait que la carrière soit pentue rajoute de l'instabilité au niveau des piliers.



Figure II.9 : Plan de la carrière souterraine de Saint-Martin-le-Nœud (Crédit : INERIS). Zone de prélèvement indiquée par un rond noir

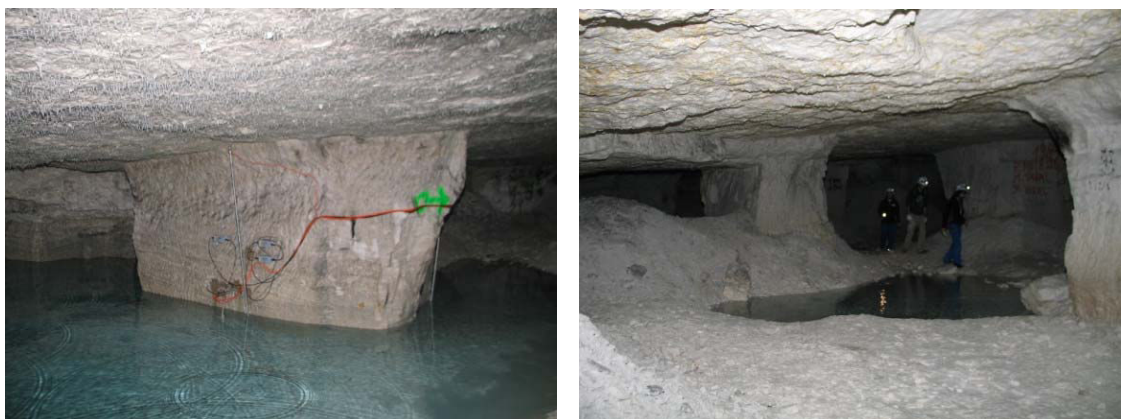


Figure II.10 : Vues sur les galeries et piliers de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (Crédit : INERIS)

II.4. CARRIÈRE DE CHÂTEAU-LANDON

II.4.1. Données géographiques et contexte historique

La carrière de craie de Mocpoix dite de Château-Landon est située sur la commune du même nom à côté du hameau de Mocpoix (Figure II.11) dans le sud de la Seine-et-Marne (77). Elle est située à flanc de coteau (70 m NGF) sur la rive gauche du Loing. La carrière est inscrite au réseau Natura2000, en tant que Zone Spéciale de Conservation (ZSC), au titre de la directive « Habitats naturels, faune, flore sauvage ». Sa superficie d'exploitation est d'environ 1 ha.

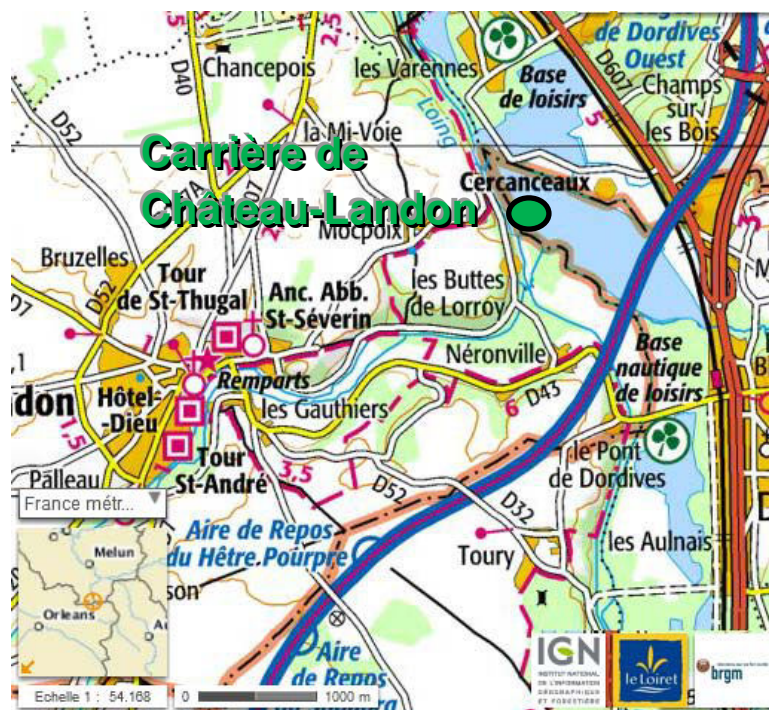


Figure II.11 : Localisation de la carrière de Château-Landon (Crédit : GéoPortail)

Cette carrière a été exploitée à partir des années 1850 pour en extraire la craie. Une fois broyée, purifiée et moulée en pain, cette craie était destinée à la fabrication de peinture et de mastic. Elle fut ensuite abandonnée. En 1926, la carrière souterraine a été reconvertie en champignonnière puis de nouveau abandonnée. En 1931, les galeries n'ont ensuite servi que d'atelier de préparation des pains de blanc d'Espagne à partir de craie en provenance de carrières voisines exploitées à ciel ouvert. De nos jours, la carrière est un site remarquable pour l'hibernation des chauves-souris d'où son classement en site Natura2000.

Dans ce secteur, plusieurs carrières souterraines de craie se sont effondrées au cours des XIX^e et XX^e siècles. Un retour d'expérience sur le principal effondrement (carrière Beaulieu) survenu en 1910 (Gombert et Cherkaoui 2011) suggère que les causes probables des effondrements pourraient être une remontée rapide de la nappe de la craie suite aux fortes précipitations et à la crue du Loing. Cette eau aurait ennoyée la base des piliers de la carrière qui, sur le coup, auraient rompu et provoqué un effondrement généralisé. Cette carrière est d'autant plus intéressante qu'elle présente des similitudes avec d'autres carrières du Bassin Parisien, à savoir celles des communes de Meudon, Clamart et Issy-les-Moulineaux en Île-de-France.

II.4.2. Contexte géologique et hydrologique

La craie est le plus important aquifère du Bassin Parisien mais n'affleure pas dans le Gâtinais. Cependant, elle est largement influencée par les nappes des terrains tertiaires qui la recouvrent et donc montre des cycles saisonniers peu marqués et irréguliers, des battements annuels faibles. Seules les pluies assez importantes agissent sur la piézométrie qui est généralement à l'équilibre avec celles des calcaires sus-jacents. La Figure II.12 présente la succession des terrains depuis les plateaux (Gâtinais). La coupe est prise au niveau de l'embouchure du Fusain (rivière desservant Château-Landon). La nappe se situerait à 1 ou 2 m en deçà de la carrière. D'après la notice de la carte géologique au 1/50 000 n°329 de Château-Landon (XXIV-18), les terrains surplombant la carrière creusée dans la craie campanienne sont composés de 9 à 10 m de craie blanche au toucher pulvérulent, entre 4 et 5 m d'argiles à silex (produit d'altération superficielle de la craie – peu présente voire absente du plateau occidental), de 7 à 10 m de poudingues à chailles (Éocène Inférieur, Paléogène, Cénozoïque) et environ 10 m de calcaires blanchâtres à texture grenue (Calcaire de Château-Landon⁹ – Éocène Supérieur, Paléogène, Cénozoïque). L'entrée en cavage de la carrière donne dans la vallée du Loing sur des alluvions quaternaires composées de sables et de limons d'une épaisseur d'environ 5 m.

⁹ C'est d'ailleurs de ce calcaire que proviennent les pierres ayant contribué à la construction de l'Arc de Triomphe à Paris.



Figure II.12: Coupe stratigraphique d'axe NW-SE passant par le Loing
(Gombert et Cherkaoui 2011)

II.4.3. Mode d'exploitation et désordres

Le dernier effondrement (Carrière Beaulieu) est survenu en date du 21 janvier 1910 pendant la crue exceptionnelle de la Seine faisant 7 morts et 7 blessés (les seules « vraies victimes » de la catastrophe). La carrière restante devait être située légèrement plus haut que ses comparses effondrées et n'a pas dû être atteinte par la remontée des eaux. La carrière étudiée est exploitée selon la méthode des chambres et piliers, mais avec des galeries en forme d'ogive ou de voûte typiques de l'exploitation de certaines carrières de craie d'Île-de-France (ex : les Montalets à Meudon). La Figure II.13 présente des vues des galeries de cette carrière. Les dimensions des galeries sont cependant plus modestes (voir Figure II.14). L'épaisseur de recouvrement varie de quelques mètres (aux entrées) à 30 m en fond de carrière. Contrairement aux carrières du sud de Paris (Meudon, Issy-les-Moulineaux, Clamart...), l'exploitation n'est composée que d'un seul étage et la géométrie n'est pas structurée. D'après le plan donné en Figure II.14, les piliers de la carrière sont assez massifs mais n'ont pas de dimensions définies. Ils sont cependant en bon état général. Le taux de défrètement avoisinerait les 75 % dans les parties les plus anciennes de la carrière. Les galeries sont relativement exemptes d'éboulis et présentent tout de même davantage d'accidents. Il s'agit souvent de toits tombés plus visibles vers l'entrée (voir photographie de droite sur la Figure II.13) que vers le fond de carrière : le coteau « glisse » vers le Loing. On peut observer d'ailleurs certains murs de faille orientés globalement dans l'axe N-S.



Figure II.13 : Vues des galeries de la carrière de Château-Landon (Crédit : INERIS)

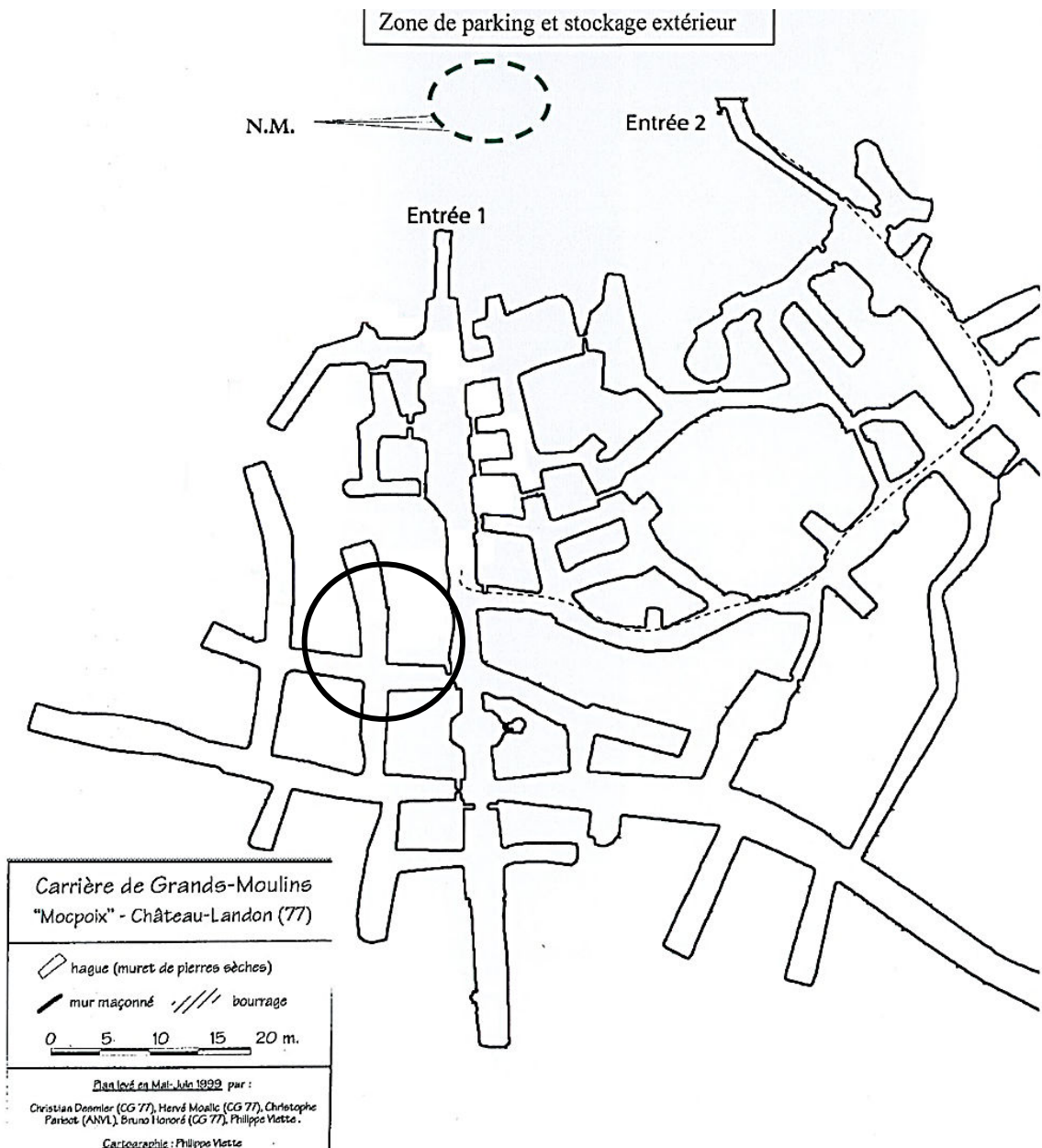


Figure II.14 : Plan de la carrière de Château-Landon (Crédit : CG77). Zone de prélèvement indiquée par un rond noir

II.5. CONCLUSION

Les trois carrières retenues possèdent des caractéristiques structurales et hydrogéologiques suffisamment différentes pour prétendre couvrir une certaine diversité de la craie. Le Tableau II.1 en présente un récapitulatif.

Tableau II.1 : Comparaison des sites expérimentaux (d'après Gombert 2014)

Site		Estreux	Saint-Martin (pilier n°1)	Saint-Martin (pilier n°2)	Château- Landon
Stratigraphie		Turonien	Santonien		Campanien
Géomorphologie		Tabulaire	Flanc d'anticlinal (pendage d'environ 4° vers le N-E)		Tabulaire (Coteau)
Hygrométrie mesurée		80 % à 100 %			
Accès avec l'extérieur		Puits	Puits + entrée étroite		2 entrées en cavages
Durée/période d'exploitation		D'au moins 1850 à 1870	Du XII ^e siècle à 1830		De 1850 à 1926
Taux de défrètement		78 %	50.4 % à 66.5 %		≈ 75 %
Produit de l'exploitation		Pierres de taille	Pierres de taille et chaux		Peinture et mastic
Ennoyage	Fréquence	5 à 10 ans	Ennoyage permanent	Ennoyage discontinu	Exceptionnel Crue centennale
	Hauteur	0.50 à 2.50 m	0.7 à 1.50 m	0 à 1.50 m	> 0.30 m
Pilier	Section	2 x 2 m	4 x 3 m	2 x 2.50 m	≈ 2 x 2 m
	Hauteur	3 m	3 m	5 m	≈ 3 m
	Profondeur	17 à 20 m	≈ 30 m	≈ 20 m	≈ 100 m

Le chapitre précédent faisait état de données physiques et mécaniques de différentes craies situées à différentes profondeurs dans le Bassin Parisien en fonction de leur âge géologique. Plusieurs mécanismes exposés dans le chapitre précédent peuvent s'appliquer à ces trois carrières de craie. Il conviendra de les étudier plus en détails dans les chapitres suivants, à l'aide de différents prélèvements en provenance de ces carrières. Nous nous intéresserons en particulier aux caractéristiques physico-mécaniques, à la caractérisation du comportement à long terme et du « vieillissement » de la craie.

Chapitre III : Étude des propriétés physico-mécaniques des craies

Résumé :

Ce chapitre a pour but d'apporter une connaissance plus précise et rigoureuse des trois craies étudiées. Il se décline en deux sous-parties.

La première présente les propriétés physiques des craies étudiées et leur rapport à l'eau. L'objectif essentiel de cette caractérisation est de pouvoir discriminer les principaux facteurs du comportement mécanique des craies et le rôle de chacun dans la relation eau-craie.

La deuxième s'intéresse à la caractérisation du comportement mécanique à court terme des craies et fait le lien avec leurs propriétés physiques. Elle permet, d'une part, de montrer que ce comportement mécanique dépend en grande partie de la porosité des craies mais également des minéraux qui les constituent ainsi que de leur agencement et d'autre part, d'analyser l'influence de l'hygrométrie sur ce comportement.

Mots-clés : *craie, rétention d'eau, hygrométrie, comportement mécanique à court terme, porosité, microstructure*

III.1. INTRODUCTION

La craie étant un matériau classé comme intermédiaire, les protocoles expérimentaux d'essais mécaniques utilisés en mécanique des sols (essais œdométriques par exemple) et en mécanique des roches peuvent s'appliquer et les résultats peuvent se recouper d'une discipline à l'autre.

Outre l'état de fracturation et l'état de contrainte du massif, les propriétés macroscopiques de chaque roche dépendent toujours de la structure de son milieu poreux. Roche poreuse par excellence, la craie voit son comportement mécanique régi en priorité par ses propriétés physiques (cf. Chapitre I), à savoir sa minéralogie, sa microstructure et sa réactivité au fluide saturant et ce, de manière intime aux variations de ces dernières. De nombreuses études mécaniques ont été effectuées sur ce matériau depuis l'attrait de la craie en tant que roche réservoir par l'industrie pétrolière et l'effondrement du gisement Ekofisk, à l'époque inexplicable, dans la Mer du Nord en 1977. Aujourd'hui, les recherches sont également motivées par la nécessité de prédire la stabilité à long terme des carrières de craie abandonnées, notamment en zone urbanisée.

Dans cette optique, la première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude du milieu poreux des craies présentées au Chapitre II. Elle a été effectuée de façon à appréhender au mieux le comportement mécanique des craies en provenance des dites carrières et l'impact de l'eau sur celui-ci, en particulier la relation eau/craie unique pour chaque craie. Cette étude comprend une analyse pétrographique ainsi que des mesures de perméabilité, de porosité et d'isothermes de sorption. Toutes les mesures/études ont été effectuées au sein du laboratoire GeoRessources.

La deuxième partie de ce chapitre, consiste à qualifier/quantifier les influences de ces propriétés sur le comportement mécanique des craies. Dans le présent chapitre, seul le comportement à court terme sera analysé. Le comportement mécanique à long terme lui fera l'objet du Chapitre V. Les roches caractérisées mécaniquement à court terme concernent les trois faciès de craie : les essais dans des conditions partiellement saturées concernent les faciès glauconieux et dolomitique tandis que ceux en conditions sèche et complètement saturée concernent les trois faciès. Cette partie a donc pour vocation d'exposer une synthèse et une analyse des différents essais mécaniques effectués sur ces roches et les procédures expérimentales ayant permis d'obtenir ces résultats.

III.2. INDICATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉCHANTILLONNAGE

L'échantillonnage a été effectué dans des blocs de craie et des sondages horizontaux en provenance des trois carrières.

Toutes les éprouvettes destinées à l'étude du comportement à court terme sont référencées par 2 lettres suivies d'un indice :

- CHxx : Château-Landon
- EXxx : Estreux
- SMxx : Saint-Martin-le-Nœud

Toutes les éprouvettes destinées à l'étude du vieillissement sont référencées par une lettre correspondant à la carrière suivie du numéro de sondage horizontal, de la côte et du numéro d'échantillon :

- Cx-yyy-z : éprouvette n° z prélevée à la profondeur yyy du sondage x dans la carrière de Château-Landon
- Ex-yyy-z : éprouvette n° z prélevée à la profondeur yyy du sondage x dans la carrière d'Estreux
- Mx-yyy-z : éprouvette n° z prélevée à la profondeur yyy du sondage x dans la carrière de Saint-Martin-le-Nœud

Les éprouvettes destinées à l'étude du comportement à long terme n'ont pas de dénomination particulière.

Les éprouvettes sont cylindriques ou cubiques. Les éprouvettes cylindriques, de diamètre 20 mm, 38 mm ou 50 mm et d'élancement 2 sont extraites des blocs ou des sondages à l'aide d'une carotteuse à l'air ou à l'eau le cas échéant. Elles sont ensuite découpées et rectifiées à l'aide d'une double scie circulaire (pour $\varnothing=38$ ou 50 mm) ou d'une scie à fil diamantée ($\varnothing=20$ mm). Les éprouvettes cubiques ($c\approx 50$ mm) sont taillées à la scie à fil diamantée puis rectifiées. La rectification permet d'assurer des surfaces planes, lisses et parallèles. Peu importe la forme de l'éprouvette considérée, celle-ci est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse de haute précision (1/50^{ème} mm) – six mesures de diamètre et deux mesures de hauteur – et étuvée à une température de 60°C pendant une durée de 24 h minimum avant la première pesée. Cette « basse » température assure que la craie ne sera pas endommagée par le séchage. Les éprouvettes sont considérées comme sèches lorsque la variation de leur masse ne dépasse pas 0.2 % à 24 h d'intervalle.

Suivant que l'éprouvette soit instrumentée ou non, la saturation se fait selon deux méthodes : dans le cas d'une éprouvette non instrumentée, il s'agira d'une saturation à vide et dans le cas contraire, l'éprouvette est plongée dans de l'eau équilibrée chimiquement avec la craie (eau préalablement préparée avec des chutes). S'ensuivent des étapes de pesée jusqu'à ce que la masse de l'éprouvette ne varie plus (durée moyenne d'une à deux semaines environ). Certaines conduites des essais et des mesures spécifiant un échantillonnage et une préparation/instrumentation particuliers, ceux-ci seront précisés à chaque mode opératoire.

III.3. ETUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CRAIES

III.3.1. Dispositifs et protocoles expérimentaux

III.3.1.1. Masses volumiques et pétrographie

Les différentes masses volumiques ont été soit calculées, soit mesurées. La masse volumique sèche est déterminée selon la norme NF P 94-410-2. La masse volumique sèche ρ_d est donnée par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_T} \quad (\text{III.1})$$

Avec m_d la masse sèche de l'échantillon et V_T le volume total. La masse volumique saturée ρ_h est calculée de la même manière mais en utilisant cette fois-ci la masse saturée m_h de l'échantillon.

La détermination de la masse volumique des grains ρ_s est faite au pycnomètre à hélium (procédure GeoRessources MR1-03 d'après XP CEN ISO/TS 17892-4). Le pycnomètre détermine les volumes réels par mesure d'une variation de pression d'hélium dans un volume calibré. L'échantillon est étuvé puis broyé. La granulométrie du matériau broyé est inférieure à 80 μm . On remet le matériau une fois de plus à l'étuve de façon à éliminer toute présence d'eau puis on le pèse (balance à 0.0001 g près) et on lance l'essai. Pour cette raison, le délai entre la sortie de l'étuve, la pesée du matériau et le lancement de l'essai doit être le plus court possible.

La teneur w en eau est déterminée selon la norme NF P 94-410-1. Elle est exprimée en pourcentage et l'intervalle est de 0 à 1.

Le degré de saturation Sr_w se calcule à partir de divers paramètres déjà mesurés (ou calculés). Il s'exprime de cette façon :

$$Sr_w = \frac{w}{\rho_w \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right)} \quad (\text{III.2})$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau liquide. Il faut cependant rester pragmatique car l'incertitude de cette grandeur est importante aux valeurs extrêmes.

L'étude des propriétés physiques d'un matériau passe obligatoirement par l'étude de sa pétrographie, sa minéralogie et sa structure. Pour cela, une étude pétrographique visuelle des échantillons (éprouvettes par exemple) et une étude de lames minces au microscope optique polarisant accompagnée le cas échéant par une étude au microscope électronique à balayage (MEB) permettront de classer les différentes craies et de connaître leur texture. Dans les minéraux, suivant la direction de polarisation de la lumière, celle-ci n'aura pas la même vitesse. Lorsqu'un rayon lumineux traverse un cristal, il se dédouble en deux rayons de polarisation différente (biréfringence) de vitesse différente suivant la nature du cristal (isotrope ou non). Le filtre analyseur discrimine ces rayons et les cristaux suivant leur nature apparaissent

plus ou moins colorés et lumineux. Cette étude semi-quantitative, basée sur une analyse de surface sur 300 points avec comptage de points selon un pas constant, permet d'appréhender les différents minéraux accessoires composant la craie, de déterminer sa composition minéralogique et sa structure.

La teneur en carbonates $[\text{CO}_3^{2-}]$ est déterminée à l'aide du calcimètre de Dietrich-Fuhling suivant la norme NF P 94-048. Une masse d'environ un gramme de roche est broyée puis soumise à une attaque acide de 6 N. Le volume de gaz carbonique dégagé est mesuré et le pourcentage de carbonates calculé. Une discrimination sur le carbonate composant la roche peut être obtenue suivant la concentration en acide (dolomite ou calcite). Dans notre cas, on ne se focalise que sur la calcite.

III.3.1.2. Mesure des vitesses d'onde de compression et de cisaillement

Les mesures de vitesses des ondes de compression P (primaires) et de cisaillement S (secondaires) sont de bons indicateurs de l'état de fissuration naturelle de la roche, de ses modules élastiques dynamiques, de sa porosité et de sa possible anisotropie structurale. Les essais ont été menés sur des éprouvettes cylindriques et des cubes selon la norme NF P 94-411. Les éprouvettes cubiques ont l'avantage de présenter trois directions de mesures des vitesses des ondes. L'échantillon à analyser est placé entre deux transducteurs (un d'envoi et un de réception). Le type d'onde (de compression ou de cisaillement) dépend du type de transducteur utilisé. La liaison entre l'échantillon de roche et les transducteurs est assurée par un couplant visqueux rinçable à l'eau et une légère contrainte appliquée sur l'ensemble. Un oscilloscope permet la visualisation du signal reçu et la durée de parcours de l'onde (temps de « retard ») est mesurée. Connaissant la longueur que l'onde doit traverser, on peut déterminer la vitesse des ondes à 50 m/s près.

Il est également possible de calculer un module de Young E_{dyn} et un coefficient de Poisson ν_{dyn} qualifiés de dynamiques à partir de ces mesures :

$$\nu_{dyn} = \frac{\frac{1}{2} \frac{V_s^2}{V_p^2}}{1 - \frac{V_s^2}{V_p^2}} \quad (\text{III.3})$$

$$E_{dyn} = \rho \frac{V_s^2 \left[3 - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \right]}{1 - \frac{V_s^2}{V_p^2}} \quad (\text{III.4})$$

Avec V_p et V_s les vitesses des ondes P et S et ρ la masse volumique de l'échantillon testé. Les mesures des vitesses d'ondes dans les cas sec et saturé se font sur le même échantillon.

III.3.1.3. Propriétés du milieu poreux

III.3.1.3.1. Perméabilités intrinsèques

Deux types de perméabilité intrinsèque ont été considérés ici en tenant compte de la mouillabilité des craies. Il a été établi dans des études précédentes que le comportement mécanique de la craie diffère en fonction du fluide saturant qu'il soit mouillant ou non-mouillant. Ces observations ont été faites dans le cadre des études pour les pétroliers, en ayant à l'esprit que le couple fluide mouillant/non-mouillant était représenté par le couple eau/pétrole. On pourra citer notamment les études faites sur les craies saturées au kérosène et au soltrol de Schroeder 2002, Homand et Shao 2000c, Schroeder et Shao 1996. Le fluide non-mouillant ici ne provoque aucune réaction chimique lorsqu'il est mis en contact avec le solide.

Les carrières souterraines ne présentent pas ce cas de figure. Dans notre cas, le couple fluide mouillant/non-mouillant est le couple eau (liquide ou vapeur)/air (fraction sans vapeur). Pour rappel, le fluide non mouillant n'est pas censé engendrer de réactions chimiques lorsqu'il est mis en contact avec le solide. L'air sec est constitué à 78 % d'azote, 21 % d'oxygène et 1 % de gaz rares, méthane et dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone est une étape du cycle du carbone dont fait partie les roches carbonatées. Le meilleur gaz représentatif de l'air sec et ne présentant aucun risque d'interaction chimique avec la craie est le diazote.

La très forte porosité des craies étudiées et la fourchette de valeur de la perméabilité pour les craies en général (cf. Chapitre I) nous donne la possibilité d'effectuer les mesures en régime permanent, avec l'utilisation d'un volume représentatif de roche. Que ce soit pour mesurer la perméabilité à l'eau ou la perméabilité à l'azote, dans les deux cas, l'échantillon est contenu dans une enveloppe en caoutchouc entre deux têtes en acier inoxydables permettant le passage du (des) fluide(s). L'échantillon doit être placé sous confinement afin d'assurer l'étanchéité du dispositif et empêcher d'éventuels effets de bords. Pour cela il est recommandé que la pression de confinement soit supérieure à la pression d'injection d'au moins 10 bars (1 MPa) pour les faibles pressions d'injection et au moins 20 bars (2 MPa) pour les pressions d'injection au-dessus de 80 bars (8 MPa). Le confinement est donc réglé à 2 MPa.

La perméabilité intrinsèque à l'azote K_{N_2} est obtenue par l'utilisation d'un perméamètre de type IFP (voir schéma, Figure III.1a). Cet appareillage nécessite l'utilisation d'un échantillon de roche d'un diamètre de 50 mm. La température et la pression atmosphérique sont mesurées dès que l'échantillon est placé à l'intérieur de l'appareil. Le confinement est ensuite assuré par du diazote. Le passage du gaz dans l'échantillon, s'il est injecté à pression trop forte, peut provoquer un détachement des particules constitutives de la roche (certaines craies sont très friables), puis un colmatage. On établit le premier palier de pression d'injection de gaz. Plusieurs mesures de débit successives sont faites à intervalle de temps régulier afin de s'assurer de sa stabilisation avant de passer au palier de pression d'injection suivant. Le diazote est injecté suivant 10 pas de pression d'injection, tous

les 0.1 MPa, de 0.1 à 1.0 MPa, jusqu'à atteindre une stabilisation du débit, puis l'on passe au palier suivant. Le diazote est un gaz inerte auquel on peut appliquer la loi des gaz parfaits. La loi de Darcy est alors appliquée (point de pression par point de pression) pour un gaz.

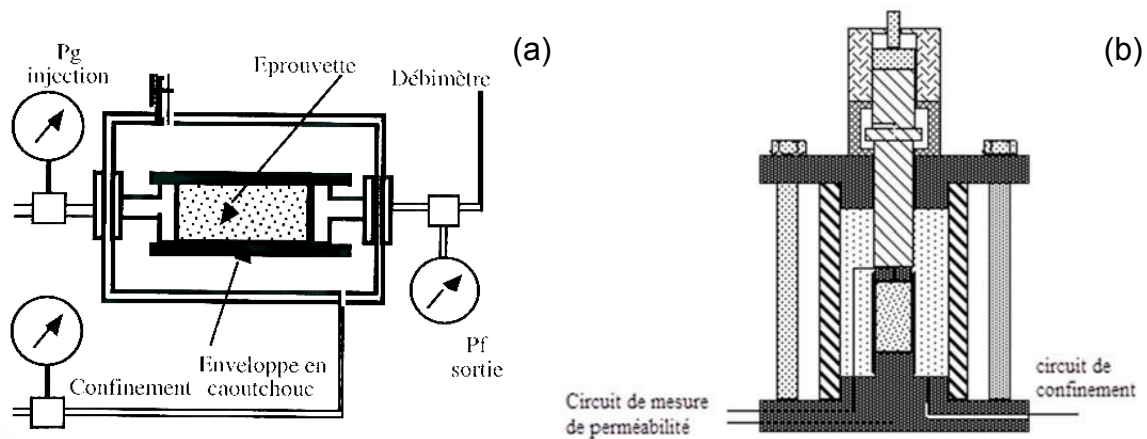


Figure III.1 : Dispositif expérimental de mesure de la perméabilité : (a) au gaz (Perméamètre de type IFP d'après Homand et al. 2000) et (b) à l'eau (Utilisation d'une cellule de compression triaxiale d'après procédure GeoRessources MR3-03)

La perméabilité à l'eau K_{H_2O} s'obtient selon le même principe que pour la perméabilité à l'air. La seule différence vient du type d'appareillage et les contraintes apportées par celui-ci, ici une cellule triaxiale permettant d'appliquer un confinement et le passage de fluide à travers l'échantillon (voir Figure III.1b). Elle est obtenue par la mesure du volume d'eau injecté en fonction du temps et ce, en régime permanent. La cellule triaxiale utilisée en conditions drainées pour ce type d'essai impose une géométrie de l'échantillon différente de celle utilisée pour le perméamètre IFP : les échantillons sont de diamètre $\phi=38$ mm et d'une longueur plus ou moins égale à 20 mm. Les craies sont connues pour être des roches friables. Donc afin d'éviter toute dissolution et tout transport de matériau dans les circuits de la cellule, suite au passage de l'eau (fluide mouillant non-neutre chimiquement) au travers de l'échantillon, le fluide utilisé est une eau chimiquement équilibrée avec la craie qu'il va traverser et des feuilles de papier filtre sont placées entre chaque tête d'acier et l'échantillon. Une fois l'échantillon mis en place dans la cellule, un gradient de pression est appliqué et le volume d'eau injecté de chaque côté de l'échantillon enregistré à intervalle de temps régulier. Le débit Q_c est alors calculé en effectuant une régression linéaire à partir des points expérimentaux. La loi de Darcy est alors appliquée pour un liquide.

III.3.1.3.2. Porosité matricielle

Plusieurs méthodes peuvent être appliquées afin d'avoir une idée globale du type de porosité matricielle rencontrée (Figure III.2) :

- la méthode des pesées consiste à déterminer indirectement la porosité totale n (occluse + connectée) par mesure des masses volumiques sèche et des grains et la porosité connectée par mesures des masses volumiques sèche et saturée. Cette méthode reste tout de même imprécise et ne donne pas d'indications sur la structure du milieu poreux, à savoir si la porosité est matricielle ou due à de la fissuration ;

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (\text{III.5})$$

La porosité accessible à l'eau est calculée : $n_w = w \frac{\rho_d}{\rho_w}$ (III.6)

- l'analyse des images MEB donne quant à elle une « image » de la porosité. La tomographie aux rayons X donne une distribution de n (seule l'échelle et la gamme varient) ;
- la mesure directe par porosimétrie à mercure reste la méthode la plus précise pour la détermination de la porosité connectée (erreur <2 %). Elle donne entre autres, la distribution des rayons de pore au sein de l'échantillon, ainsi qu'une idée de la tortuosité du milieu poreux, par les valeurs de porosités libre et piégée. La gamme de rayons de pores est comprise entre 0.0018 μm et 90 μm avec le porosimètre utilisé. Cette méthode se base sur la loi de Jurin :

$$P_c = \frac{2 T_s \cos \theta}{R} \quad (\text{III.7})$$

Avec R le rayon du pore, θ l'angle de contact du mercure avec les parois du pore et T_s la tension de surface du mercure ($\theta=140^\circ$ pour les roches carbonatées et $T_s=485$ dynes/cm) ;

- la mesure de la surface spécifique SS permet d'obtenir d'autres informations, notamment sur les propriétés d'adsorption (voir § III.3.1.4).

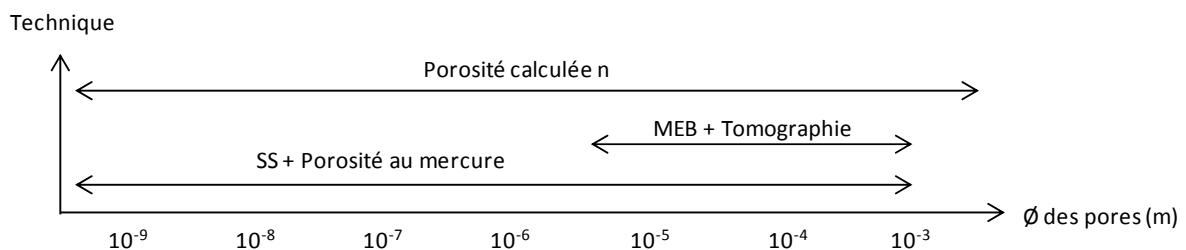


Figure III.2 : Diagramme de résolution de différentes méthodes de caractérisation de la porosité suivant le diamètre des rayons de pores

III.3.1.4. Isothermes de sorption

III.3.1.4.1. Notion de pression capillaire ou suction

La sorption est le processus par lequel une substance est adsorbée sur une autre substance. Elle résulte de l'action de molécules de gaz ou de liquide mis en contact avec un matériau solide et qui adhèrent à sa surface (McNaught et Wilkinson 1997).

Il existe diverses méthodes de détermination d'une isotherme de sorption pour un matériau. La porosimétrie au mercure est une première approche des capacités de rétention du matériau dans le cas d'un fluide non mouillant (Schroeder 2002) pour de faibles pressions capillaires. Cette méthode ne donne malheureusement qu'un chemin de drainage (la phase mouillante étant la vapeur de mercure). Dans le cas de l'eau (fluide mouillant), la méthode la plus couramment utilisée est la méthode des solutions salines saturées¹⁰ (norme NF X 15-119).

Les fluides non miscibles présents dans un milieu poreux donnent lieu à une interface supplémentaire par rapport aux cas complètement saturés. Les phénomènes de capillarité se produisent à l'interface entre deux fluides car les molécules sont soumises à des forces d'interactions non équilibrées au contraire des molécules « baignant » dans le fluide (Delage et Cui 2000). Ce déséquilibre entre forces d'attraction soumet l'interface au phénomène de tension interfaciale σ_{int} , dépendant essentiellement de la nature des deux fluides et lui donnant son rayon de courbure r_c . La pression dans le fluide non mouillant (indice n) est supérieure à celle qui règne dans le fluide mouillant (indice m). Cette condition se traduit par la loi de Laplace (III.8) :

$$P_c = -\Psi = P_n - P_m = \frac{\sigma_{int}}{r_c} \quad (III.8)$$

où la différence de pression $P_c = P_n - P_m$ est appelée pression capillaire, Ψ correspond au potentiel capillaire, appelé aussi succion en mécanique des sols. La tension interfaciale pour l'eau liquide à 25°C est de 0.072 N.m⁻¹. Généralement, la mise en traction de l'eau capillaire en conditions normales de température et de pression se produit dès que les interfaces sont confinées dans des régions où les pores ont un diamètre inférieur à 2 μ m (Daïan 2013).

Dans le cas d'un milieu poreux comportant des interfaces vapeur-liquide, le liquide ici étant le fluide mouillant, la courbure des interfaces capillaires modifie les conditions de l'équilibre thermodynamique entre vapeur et liquide. Si l'interface est fortement courbée (concavité tournée vers la vapeur), la pression partielle de vapeur est inférieure à la pression de vapeur saturante qui ne dépend que de la température (diagrammes de Clausius-Clapeyron). L'humidité relative H_r ou hygrométrie dans le cas de l'eau se définit comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur dans l'air à l'intérieur du milieu poreux et la pression de vapeur saturante. La relation entre pression capillaire et humidité relative s'obtient en exprimant l'égalité des potentiels thermodynamiques des fluides, et s'exprime par la loi de Kelvin (III.9) – ici dans le cas de la vapeur d'eau :

$$P_c = -\frac{\rho_l(T)RT}{M_{H_2O}} \ln(H_r(T)) \quad (III.9)$$

¹⁰ Il existe d'autres techniques très prisées en mécanique des sols notamment, à savoir la méthode osmotique, la plaque tensiométrique et la méthode par translation d'axes (Delage et Cui 2000).

Avec $Hr(T) = \frac{p_e}{p_0(T)}$, R la constante des gaz parfaits, $M_{H_2O} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$ la masse molaire de l'eau, ρ_l la masse volumique de l'eau et T la température en degrés Kelvin.

En terme d'écoulement, la viscosité du fluide a son importance : plus le fluide est visqueux plus le transfert sera difficile. Cependant d'un point de vue mécanique ce n'est pas tant la viscosité du fluide qui entre en jeu mais surtout sa polarité et sa densité (cf. Chapitre I § 1.3.2.3).

Les techniques utilisées pour déterminer les isothermes de sorption sont des techniques de contrôle par phase vapeur et se basent sur des approches thermodynamiques. Elles sont détaillées ci-après.

III.3.1.4.2. Méthode gravimétrique (utilisation de solutions salines saturées)

Les méthodes de détermination gravimétrique sont basées sur la mesure de la masse d'un échantillon au cours du temps, dans des conditions de température et de pression données (P et T constantes). Il s'agit de la méthode la plus simple et la plus couramment utilisée en géomécanique (elle est standardisée et particulièrement prisée en mécanique des sols et des roches). Elle est aussi très facile à mettre en œuvre.

Cette méthode consiste à placer un échantillon (de volume et de masse initiale connus) dans un dessiccateur au-dessus d'une solution saline saturée et de laisser les transferts d'eau s'effectuer entre l'atmosphère et l'échantillon jusqu'à atteindre un équilibre (thermodynamique) entre l'atmosphère et l'échantillon. La pesée de l'échantillon doit être régulière jusqu'à ce que la variation entre les différentes pesées soit négligeable. La valeur de l'humidité relative de l'atmosphère au-dessus de la solution saline saturée est fonction du sel utilisé et de la température. On peut ainsi balayer une assez large gamme d'hygrométries allant de 36.5 % (Chlorure de Calcium hexahydraté) à 98 % (Sulfate de Cuivre II pentahydraté) à 20°C.

Cette méthode présente cependant l'inconvénient de devenir chronophage pour certains matériaux très adsorbants (comme les argiles par exemple).

III.3.1.4.3. Méthode manométrique ou dynamique (utilisation de l'adsorbmètre)

La méthode dynamique est une méthode couramment utilisée pour déterminer les capacités de rétention des poudres et divers substrats. La connaissance de l'isotherme de sorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement (Jannot 2008). Elle est particulièrement prisée dans le génie agronomique pour la conservation des graines dans les silots et le génie industriel. Dans notre cas, les isothermes de sorption des trois craies ont été obtenues à l'aide d'un adsorbmètre en contrôlant la quantité de vapeur injectée, et donc l'hygrométrie, à température constante. Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter qu'un unique petit morceau de roche et de ne durer que peu de temps en comparaison de la méthode gravimétrique. De plus, les points de mesure sont

plus rapprochés que pour la méthode gravimétrique pour laquelle l'hygrométrie est dépendante de la solution saline utilisée.

Le principe est le suivant (Baillon et Loubignac 2007) : un échantillon de roche est placé dans une cellule en verre (la masse est connue) et la machine procède au dégazage sous vide à température fixée afin d'éliminer tous les gaz et autres impuretés présentes sur la surface de l'échantillon (cette phase est particulièrement importante). L'échantillon est repesé à pression atmosphérique puis dégazé. La température d'adsorption est ensuite réglée (ici $T=25^{\circ}\text{C}$ soit 298.15°K). La machine ensuite envoie un volume de gaz (ici la vapeur d'eau) correspondant à une pression et une température donnée. Après un temps fixé pendant lequel l'équilibre va être testé selon un critère de variation de pression, deux possibilités existent :

- soit le critère est vérifié et le volume adsorbé est calculé à partir de la différence de pression mesurée avant et après équilibre (la pression de l'isotherme de sorption est directement reliée à la mesure de pression) ;
- soit le critère n'est pas vérifié, le gaz est réintroduit et le critère de nouveau testé.

Les étapes d'envoi de gaz et de vérification du critère sont renouvelées jusqu'au dernier point d'adsorption voulu. Le protocole et l'étape de dégazage imposent à l'échantillon un chemin de sorption jusqu'à une hygrométrie de 100 % (l'échantillon est initialement sec) puis un chemin de désorption. Les paramètres de la machine sont résumés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Paramètres d'essai pour la détermination des isothermes de sorption par l'utilisation d'un adsorbmètre

Paramètres	Valeurs d'essai
Température de mise sous vide ($^{\circ}\text{C}$)	110
Volume standard (m^3)	$13.379 \cdot 10^{-6}$
Temps d'équilibre (s)	500
Température d'adsorption T ($^{\circ}\text{K}$)	298.15
Adsorbat	H_2O
Pression de vapeur saturante p_0 (kPa)	3.169
Encombrement S_m d'une molécule d'eau couramment admis (nm^2)	0.125

La connaissance des valeurs de pression, des volumes (de l'échantillon, volume mort, volume de vapeur injectée) et des températures permet de calculer la variation totale de masse d'eau dans le système entre deux injections (ou retraits de volume) et la variation de masse de vapeur d'eau dans l'éprouvette ; ce qui nous permet ensuite d'en déduire la variation de la masse d'eau contenue dans l'échantillon et de remonter à la variation de sa teneur en eau. Les résultats ressortant (pour chaque point de mesure) sont la teneur en eau w , la pression d'eau dans l'échantillon p_e , la pression de vapeur saturante p_0 (ne dépendant que de la température, cf. diagrammes de Clausius-Clapeyron) et l'hygrométrie correspondante.

Généralement les courbes résultat w - Hr sont de type II selon la classification BET (Brunauer et al. 1940, cf. Chapitre I). La teneur en eau de transition (soit la quantité d'eau maximale pour une monocouche) peut ainsi être lue directement sur les isothermes : il s'agit du premier changement de concavité sur les isothermes de type II. Néanmoins, puisque la courbe n'est pas continue et que le changement de concavité n'est pas toujours facilement appréhendable, cette teneur en eau de transition peut être estimée grâce à la loi BET (III.10) généralisation de la loi de Langmuir, applicable uniquement pour des $0.05 < Hr < 0.35$ et si $w=f(Hr)$ strictement croissante :

$$\frac{Hr}{(1-Hr)w} = \frac{c-1}{w_{12}c} Hr + \frac{1}{w_{12}c} \quad (\text{III.10})$$

La teneur en eau de transition w_{12} et la constante BET c sont déterminées par régression linéaire. À partir de ces données, la pression capillaire P_c (ou succion en mécanique des sols) et la surface spécifique SS peuvent être déterminées.

La première peut facilement être calculée en tout point de mesure en utilisant la loi de Kelvin et ne dépend que de la température. La courbe P_c - S_{rw} quant à elle est propre à chaque matériau. La deuxième est calculée (III.11) après obtention de la teneur en eau de transition w_{12} , valeur correspondant à la transition entre les zones monocouche et multicouche des isothermes de sorption (Jannot 2008, Baillon et Loubignac 2007, McNaught et Wilkinson 1997, Brunauer et al. 1940) :

$$SS = S_m \frac{N_{avo}}{M_w} w_{12} \quad (\text{III.11})$$

Avec N_{avo} le nombre d'Avogadro.

Remarque : les valeurs numériques de teneur en eau au plus fort degré d'humidité relative peut différer d'un échantillon à l'autre. L'échantillon est saturé lorsque le degré d'humidité est égal à 100 %. Ce n'est pas tant la valeur numérique de la teneur en eau qui importe ici mais les chemins d'imbibition/séchage que prend le matériau entre son état sec et son état saturé.

III.3.2. Résultats et interprétation

III.3.2.1. Masse volumique, pétrographie, vitesses d'onde et structure

Les résultats des grandeurs physiques des craies sont présentés dans le Tableau III.2. Il s'agit des valeurs moyennes et de l'écart-type (le cas échéant).

Au regard des différentes valeurs on peut noter que les trois craies présentent une masse volumique des grains ρ_s assez similaire. Les valeurs discriminantes sont la porosité totale n , la teneur en eau w , les masses volumiques sèches ρ_d et la teneur en carbonates $[CaCO_3]$. Les craies de Château-Landon et de Saint-Martin-le-Nœud présentent cependant des caractéristiques à peu près similaires comme la porosité n , la teneur en eau w et les masses volumiques sèches ρ_d et saturées ρ_h malgré une

différence notable dans la teneur en CaCO_3 . La craie d'Estreux se démarque nettement des deux autres craies.

Tableau III.2 : Données physiques des craies. Mesures et calculs effectués pour 20 échantillons de chaque craie

n : porosité totale ; *w* : teneur en eau ; ρ_s , ρ_h et ρ_d : masses volumiques respectivement des grains, humide et sèche ;
[CaCO_3] : teneur en carbonates

	Saint-Martin-le-Noeud, Fr	Estreux, Fr	Château-Landon, Fr
<i>n</i> (%)	42±2	35±1	44±1
<i>w</i> (%)	27±3	19±1	30±1
ρ_s (g.cm-3)	2.78	2.75	2.76
ρ_h (g.cm-3)	2.04±0.07	2.13±0.03	2.02±0.01
ρ_d (g.cm-3)	1.61±0.07	1.79±0.02	1.56±0.01
[CaCO_3]	85	75	97

La Figure III.3 présente les images des craies obtenues au microscope optique polarisant¹¹ en lumière non-analysée¹² et analysée¹³. La pétrographie apporte davantage d'informations sur la structure et la texture des trois craies. Après comptage sur les lames minces, la composition minéralogique des craies a été déterminée. Les résultats permettent de placer les craies dans le diagramme ternaire Calcite – Calcarénite – Argile et sont consignés dans le tableau de la Figure III.4.

La craie d'Estreux est une roche calcaire à quartz détritique (grains bleu ciel en lumière polarisée analysée) et glauconie (grains verts que la lumière polarisée soit analysée ou non). Elle présente également quelques plages de sparite (grains verts pomme en lumière analysée et incolore en lumière non analysée), des bioclastes (bivalves essentiellement), de la micrite (la boue) et quelques minéraux opaques (oxydes ou sulfures). Elle semble présenter une texture de type packstone selon la classification de Dunham : les éléments, en quantité assez importante, semblent baigner dans une matrice boueuse.

La craie de Saint-Martin-le-Noeud est une roche calcaire micritique (la boue) à plages de sparite et losanges parfaits d'un minéral isotrope (incolore en lumière non-analysée et opaque en lumière analysée). Elle semble présenter une texture de type wackestone selon la classification de Dunham : le constituant majeur reste la boue micritique mais la quantité de grains est trop importante pour mériter la dénomination de mudstone. Concernant les minéraux isotropes, la forme losangique est caractéristique de la dolomite (autre carbonate fréquent dans les roches sédimentaires). Une investigation effectuée au Microscope Electronique à Balayage (MEB) permet de dire que certains de ces losanges sont vides, ou remplis de

¹¹ Lorsque la lumière traverse un filtre polarisant elle ne vibre que dans une seule direction.

¹² Le microscope ne possède que le polariseur et les minéraux de la lame mince sont alors observés avec leurs teintes naturelles.

¹³ Un minéral d'une roche est également un polariseur s'il est cristallisé. Placé entre les deux polaroïds du microscope, il polarise la lumière selon des caractéristiques qui lui sont propres. Les teintes de polarisation sont alors des couleurs artificielles.

carbonates. Le fait qu'il y ait des vides et des losanges de forme parfaite signifie que la dolomite a été dissoute préférentiellement par rapport à la calcite sans que la craie n'ait subi de compaction après dissolution.

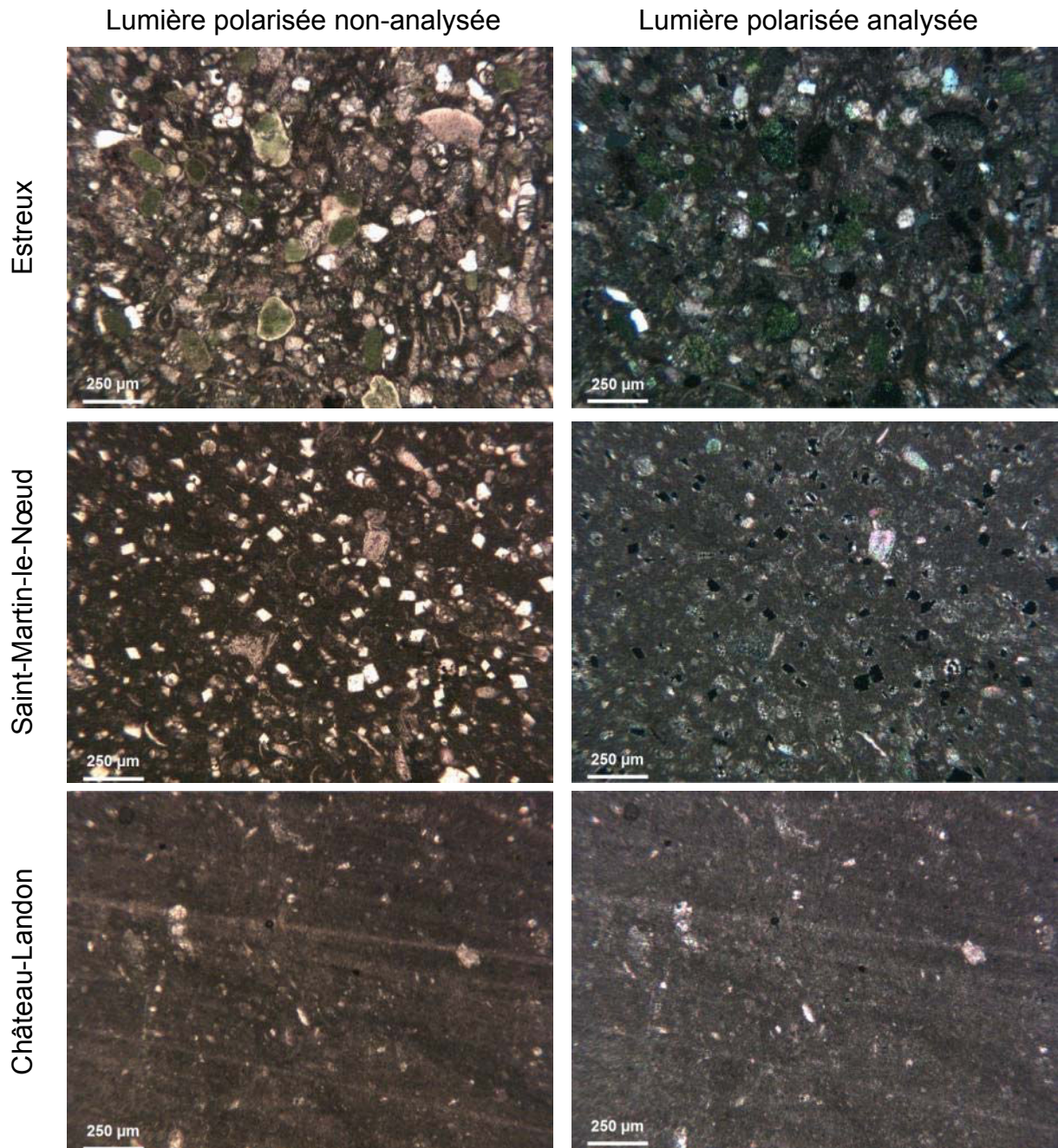


Figure III.3 : Analyses microscopiques des trois craies obtenues à l'aide de lames minces. Clichés en lumière polarisée analysée et non-analysée

La craie de Château-Landon est une roche calcaire micritique (boue) présentant quelques bioclastes et grains de sparite ainsi que quelques minéraux opaques. Elle présente une texture de type mudstone selon la classification de Dunham.

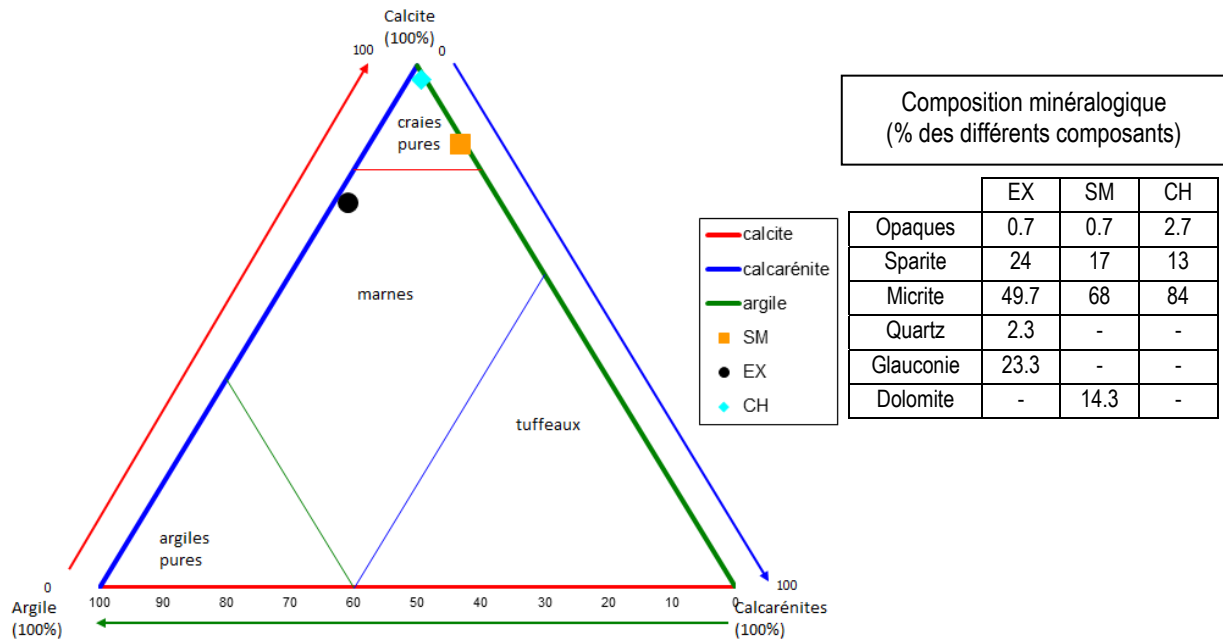


Figure III.4 : Place des trois craies dans le diagramme ternaire Calcite - Calcarénite - Argile et composition minéralogique

La glauconie est un minéral d'altération de minéraux argileux en milieu réducteur. La craie d'Estreux comporte donc une part non négligeable d'argile qui la place, dans le diagramme ternaire, dans les marnes mais à la limite des craies pures. Les deux autres craies quant à elles sont placées dans le haut du diagramme. Par rapport aux minéraux accessoires, à savoir la glauconie et la dolomite, leur présence devrait a priori influencer de manière non négligeable le comportement mécanique (d'après Monjoie et al. 1990).

Le Tableau III.3 présente les valeurs des vitesses d'ondes de compression des ondes P et de cisaillement S ainsi que les modules d'élasticité et les coefficients de Poisson dynamiques dans les cas secs et saturés. Il s'agit de valeurs moyennes. Les mesures faites sur cube et sur cylindres sont les mêmes peu importe la direction : les trois craies sont donc structurellement isotropes et ne présentent pas de fissuration majeure (conformément à ce que l'on retrouve dans la littérature).

Pour les ondes de compression, les valeurs de vitesse pour la craie d'Estreux ne diffèrent pas tellement entre les états secs et saturés compte tenu de la précision des mesures (obtention de la vitesse à 50 m/s près). Les différences deviennent significatives pour les craies de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon. Néanmoins, il s'agit d'un phénomène que l'on retrouve typiquement dans les autres craies (Broux 2010, Schroeder 2002 et cf. Chapitre I). Les valeurs de vitesse des ondes P sont du même ordre de grandeur pour les craies d'Estreux et de Château-Landon (avec une valeur légèrement plus importante dans le cas d'Estreux). Ceci peut s'expliquer par leur différence de masse volumique et de porosité. Néanmoins pour la craie de Saint-martin-le-Nœud, cette différence de plus de 1000 m/s témoigne d'une rigidité plus importante que pour ses compagnes (les ondes P se

propagent plus facilement dans un milieu « dur »). Elle est facilement représentée par la valeur du module de Young dynamique (presque le double de celui calculé pour la craie d'Estreux).

Tableau III.3 : Valeurs des vitesses des ondes de compression P et de cisaillement S avec valeurs du module de déformabilité et du coefficient de Poisson dynamiques. Mesures et calculs effectués sur 10 échantillons de chaque craie

	Vp (m/s) sec / sat	Vs (m/s) sec / sat	$E_{\text{sec}} / E_{\text{sat}}$ dyn (GPa)	$\nu_{\text{sec}} / \nu_{\text{sat}}$ dyn
EX	2250 / 2350(±50)	1400 / 900(±50)	7.5 / 4.8	0.18 / 0.42
SM	3200 / 3350(±50)	1900 / 1600(±50)	13.3 / 13.8	0.24 / 0.33
CH	2000 / 2200(±50)	1200 / 950(±50)	5.2 / 4.7	0.21 / 0.39

Pour les ondes de cisaillement S, on peut retrouver le même constat que pour les ondes P quant aux similitudes entre les craies d'Estreux et de Château-Landon et les différences avec la craie de Saint-Martin-le-Nœud. Ce type d'onde ne se propageant pas dans les liquides, il est logique de retrouver des valeurs plus faibles dans les cas saturés. L'écart entre les cas sec et saturé est toutefois plus important dans le cas de la craie d'Estreux que dans le cas des craies de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon. Ces différences s'expliquent en partie par leur texture, les craies de Château-Landon et de Saint-Martin-le-Nœud ayant des tailles et formes des grains plus homogènes que la craie d'Estreux. Quant aux paramètres dynamiques, ceux-ci donnent une idée de la rigidité, de la contraction et de la sensibilité à l'eau de la craie. La craie de Saint-Martin-le-Nœud est rigide et ne présente pas de sensibilité à l'eau marquée (pas de différences entre les modules de l'état sec à l'état saturé, mais une légère augmentation du coefficient de Poisson dynamique). Au contraire, les craies d'Estreux et de Château-Landon, voient leur module de Young chuter de l'état sec à l'état saturé avec une augmentation significative du coefficient de Poisson. Ce qui signifie que ces deux craies sont davantage ductiles que la toute première, et d'autant plus que le matériau est saturé (réponse « non drainée »). Il semblerait également que la craie de Château-Landon soit plus sensible à l'eau que la craie d'Estreux.

La Figure III.5 présente une confrontation de ces divers paramètres avec les craies de la bibliographie. Mis à part le fait que ces craies sont à peu près similaires aux autres craies de leur étage géologique, il est bon d'ajouter que les divers paramètres trouvés pour la craie d'Estreux correspondent à ceux trouvés dans des études précédentes (Nguyen 2009, Priol 2005, Priol et al. 2004).

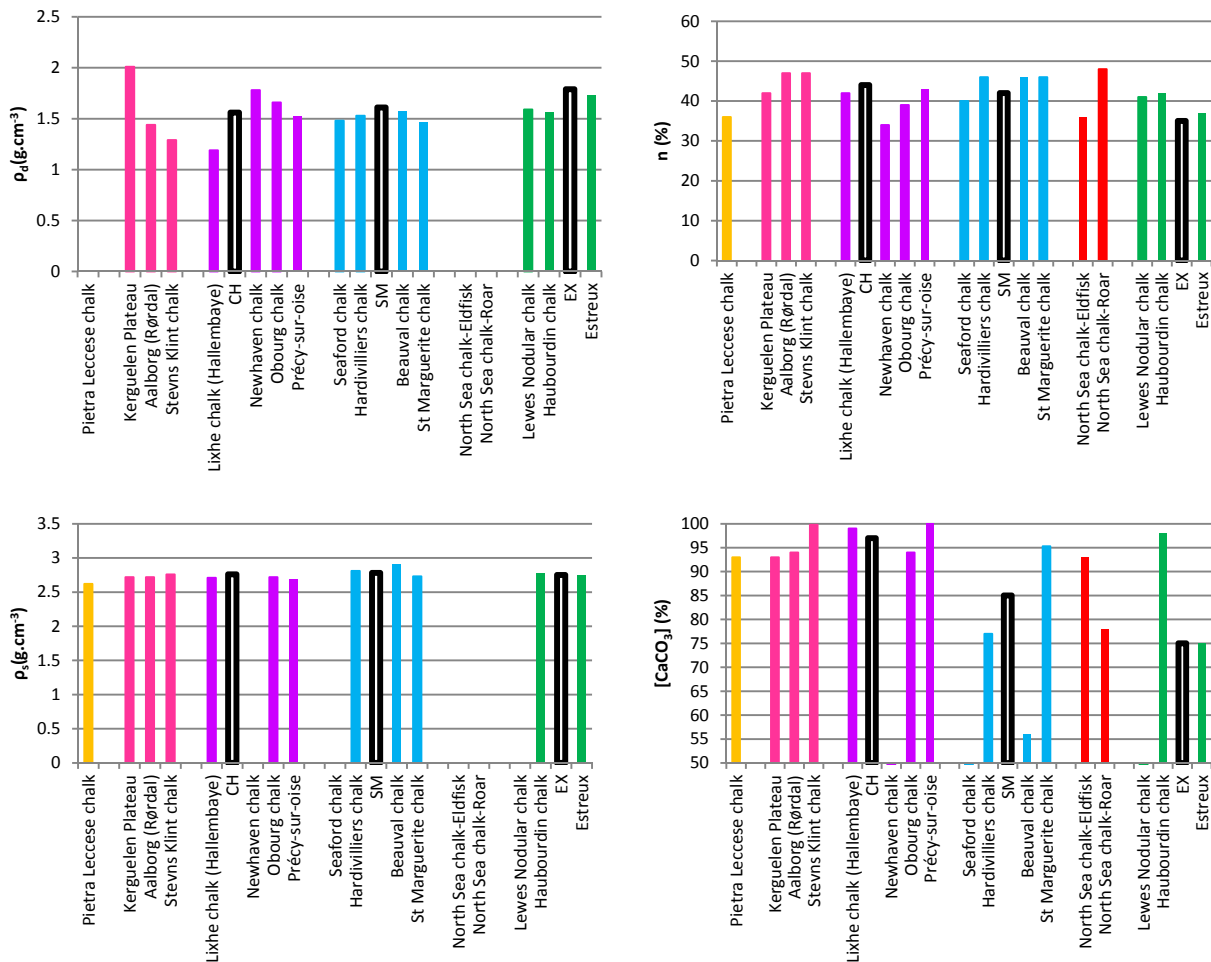


Figure III.5 : Confrontation des trois craies avec les données de la littérature

Légende : ρ_d : masse volumique sèche; n : porosité; ρ_s : masse volumique des grains; [CaCO₃] : teneur en carbonate de calcium – Âges géologiques des craies de faibles profondeurs : Miocène (orange), Maastrichtien (rose), Campanien (violet), Santonien (bleu), Turonien (vert) – Craies de grande profondeur (rouge)

III.3.2.2. Propriétés du milieu poreux

Les résultats des perméabilités à l'azote et à l'eau sont consignés dans la Figure III.6. Les perméabilités calculées sont des moyennes de valeurs sur plusieurs mesures et plusieurs échantillons (voir Annexe B). Pour les perméabilités à l'air, les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud possèdent la même perméabilité à l'azote. La craie de Château-Landon présente une perméabilité d'un ordre supérieur. Le diazote a donc plus de facilité à se déplacer au sein de la craie de Château-Landon que dans les craies de Saint-Martin-le-Nœud ou d'Estreux. Alors que les deux premières présentent une porosité similaire. Cependant ces deux paramètres ne sont pas nécessairement reliés, cela dépend en grande partie de la connectivité des pores au sein du milieu poreux.

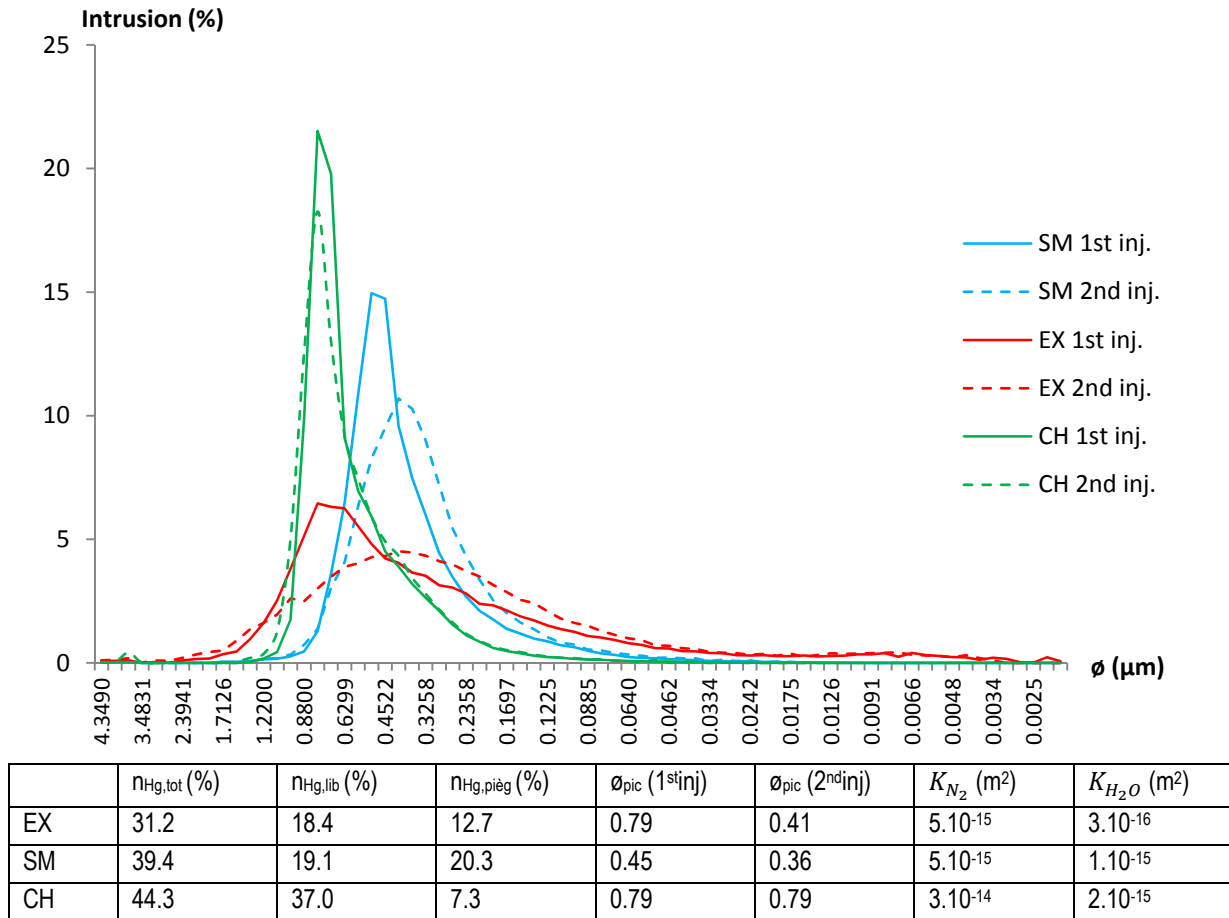


Figure III.6 : Porosités, perméabilités et diagramme des rayons de pores en 1^{ère} et 2^{ème} injection pour les craies d'Estreux (rouge), de Saint-Martin-le-Nœud (bleu) et de Château-Landon (vert)

Pour les perméabilités à l'eau, les craies de Château-Landon et d'Estreux possèdent une perméabilité à l'eau d'un ordre de grandeur inférieur à leur perméabilité au diazote. La craie de Saint-Martin-le-Nœud ne voit qu'une différence d'un demi-ordre de grandeur entre ses perméabilités à l'eau et au diazote. Cette différence (ou similitude) peut s'expliquer par la viscosité des fluides et la mouillabilité des craies. Les mêmes conclusions que dans le cas du diazote sur la facilité de passage du fluide peuvent être tirées. Les résultats de porosimétrie à mercure – porosités totales, libres et piégées ainsi que les rayons de pores au pic – sont consignés dans la Figure III.6. Les courbes pleines représentent la distribution des rayons de pore à la 1^{ère} injection, les courbes en pointillés correspondent à la 2^{ème} injection. Les valeurs de porosité déterminées au porosimètre à mercure sont du même ordre que les porosités calculées par la méthode des pesées, avec peut-être de légères variations (voir paragraphes précédents). Les trois craies présentent une macroporosité et une mésoporosité.

La craie d'Estreux présente un profil porosimétrique étalé sur une assez large gamme de rayons de pores et est assez semblable à ceux des calcaires. Le réseau

poreux est peu homogène. Le rayon de pores au pic pour la première injection est de 790 μm et pour la deuxième de 410 μm . Les craies de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon présentent des profils porosimétriques resserrés autour d'une même valeur de rayon de pore en première comme en seconde injection respectivement 450 nm et 360 nm pour Saint-Martin-le-Nœud et 790 nm pour Château-Landon. Ceci témoigne – dans le cas de la première injection – d'un réseau poreux très homogène. Néanmoins le rayon de pore au pic à la deuxième injection suggère que le réseau poreux de la craie de Saint-Martin-le-Nœud est plus tortueux que celui de la craie de Château-Landon. Cette remarque est bien évidemment à relier à la texture de la roche.

La Figure III.7 présente une confrontation de ces divers paramètres avec les craies de la bibliographie. Mis à part le fait que ces craies sont à peu près similaires aux autres craies de leur étage géologique, il est bon d'ajouter que les divers paramètres trouvés pour la craie d'Estreux correspondent à ceux trouvés dans des études précédentes (Nguyen 2009, Priol 2005, Priol et al. 2004).

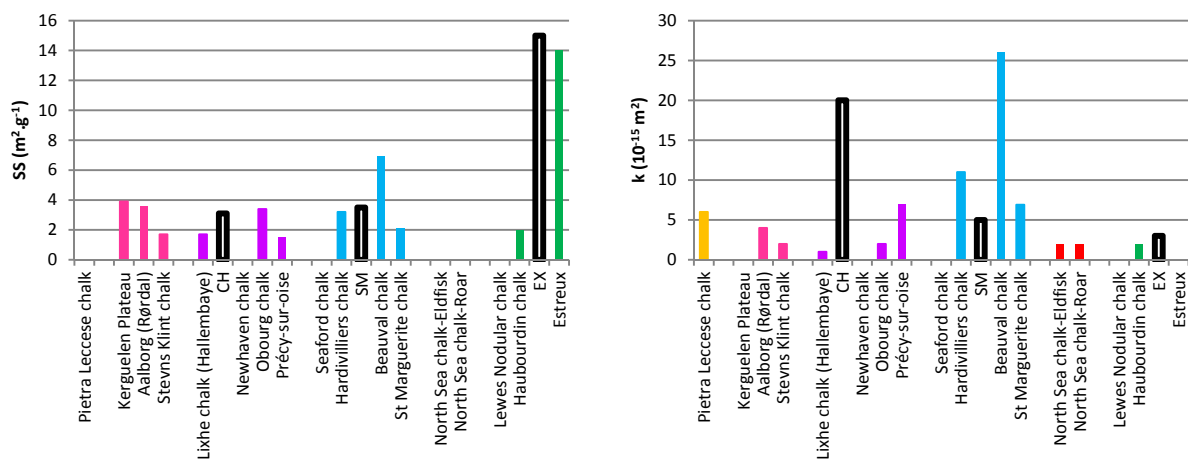


Figure III.7 : Confrontation des trois craies avec les données de la littérature

Légende : K : perméabilité intrinsèque; SS : surface spécifique – Âges géologiques des craies de faibles profondeurs : Miocène (orange), Maastrichtien (rose), Campanien (violet), Santonien (bleu), Turonien (vert) – Craies de grande profondeur (rouge)

On peut cependant ajouter que la craie de Château-Landon possède une perméabilité intrinsèque bien supérieure à celles de ses comparses du même âge (qui ont pourtant d'autres propriétés similaires comme la porosité ou la concentration en carbonate de calcium). Tout comme pour la craie dolomitique, présentant des valeurs de perméabilités bien inférieure à celle de ses comparses, cette disparité n'est due qu'à l'environnement de dépôt, à la hauteur de recouvrement et à la tectonique de la région.

III.3.2.3. Isothermes de sorption

Les isothermes de sorption sont présentées en Figure III.9, Figure III.10 et Figure III.11 respectivement pour les craies d'Estreux, de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon. Chaque figure présente deux courbes correspondant aux chemins d'imbibition (courbe du bas) et aux chemins de séchage (courbe du haut). Le Tableau III.4 présente les données relatives aux échantillons utilisés pour l'adsorbimètre selon le protocole exposé au § III.3.1.4.3. Les données sur les échantillons utilisés via la méthode des solutions salines sont situées en annexes et sont utilisées par la suite pour des essais mécaniques. En termes de corrélation, la méthode des solutions salines et la méthode dynamique semblent assez bien corrélées pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud. Les points – chacun correspondant à un échantillon – se superposent aux courbes de rétention d'eau. Sur chacune des courbes – et ce peu importe la craie – on retrouve une hystérésis caractéristique de la complexité du milieu poreux. Cette hystérésis reste plus ou moins marquée selon les échantillons. Les branches de sorption et de désorption sont quasi-parallèles. De plus, selon la classification B.E.T. (Brunauer et al. 1940), les trois craies présentent des isothermes plutôt de type II très répandus pour des solides macroporeux, voire de type H3 car présentant une hystérésis caractéristique d'une condensation capillaire et d'un remplissage des mésopores.

Tableau III.4 : Données d'essais et physiques des échantillons utilisés pour la détermination des isothermes de sorption par la méthode de l'adsorbimètre. Les valeurs entre crochets et en italique ont respectivement été obtenues à partir des courbes de sorption et de désorption

	EX1	EX2	SM1	SM2	CH1	CH2
w_{12} (kg.kg ⁻¹)	[1.67] <i>1.71</i>	[0.31] <i>0.38</i>	[0.07] <i>0.09</i>	[0.04] <i>0.08</i>	[0.07] <i>0.12</i>	[0.06] <i>0.08</i>
C	[5.80] <i>3.91</i>	[4.68] <i>3.64</i>	[5.49] <i>3.72</i>	[4.75] <i>3.86</i>	[2.26] <i>4.05</i>	[4.75] <i>3.74</i>
Surf. Spé. SS (m ² .g ⁻¹)	[70.13] <i>71.82</i>	[13.17] <i>15.85</i>	[3.11] <i>3.75</i>	[1.83] <i>3.30</i>	[4.98] <i>2.85</i>	[2.40] <i>3.31</i>

L'adsorption semble essentiellement physique. En regard des faibles valeurs – mais supérieures à 2 – de la constante C, la transition entre les adsorptions monocouche et multicouche n'est pas nette mais suffisamment visible¹⁴. La surface spécifique de la craie d'Estreux est nettement plus importante (conforme à ce qu'a avancé Nguyen 2009) que celle des deux autres craies – qui possèdent des surfaces spécifiques du même ordre de grandeur. Ceci est sans aucun doute à relier à sa fraction argileuse non négligeable. Pour une lecture aisée, les régions classiques de l'isotherme de type II sont délimitées dans la Figure III.8.

¹⁴ Le fait qu'il n'y ait pas de point de changement de concavité clairement identifiable et une montée continue de la quantité adsorbée est le signe d'une hétérogénéité énergétique de la surface vis-à-vis des interactions adsorbat/adsorbant (Baillon et Loubignac 2007), ce qui ne semble pas être le cas pour les trois craies.

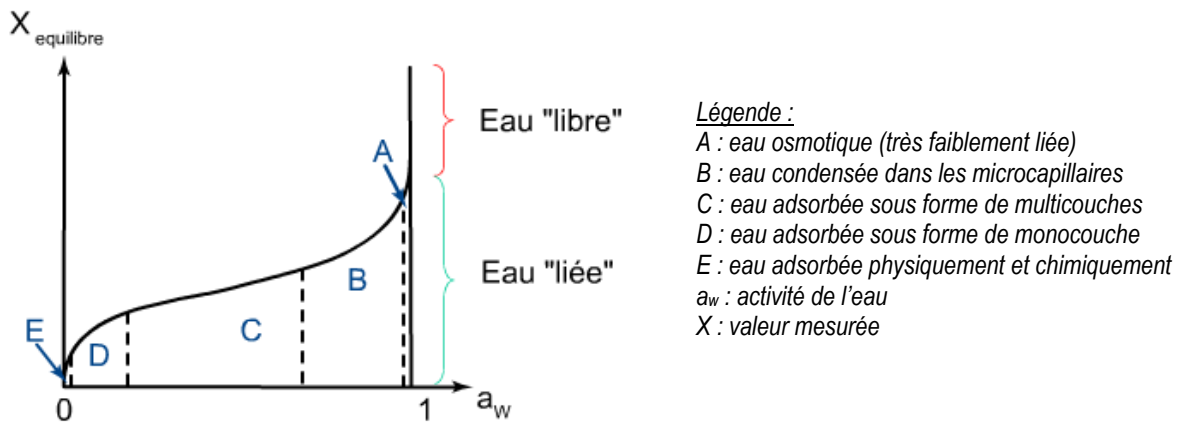


Figure III.8 : Différentes régions d'une isotherme de sorption (Baillon et Loubignac 2007)

○ Craie d'Estreux

En regard des données présentes dans le tableau et les courbes sur la Figure III.9a, les courbes de sorption pour la craie d'Estreux ne se reproduisent pas de la même façon d'un échantillon à l'autre : l'échantillon EX1 adsorbe 5 fois plus que l'échantillon EX2. Néanmoins en regard de la Figure III.9b, les formes des isothermes sont les mêmes peu importe l'échantillon considéré (EX1 ou EX2). Les hystérésis sont plus ou moins ouvertes suivant l'échantillon considéré. La plage correspondant à l'adsorption multicouche (C sur la Figure III.8) est assez étendue par rapports aux plages « monocouche » et « eau condensée » (plage B et D sur la Figure III.8). La plus grande partie de l'adsorption se retrouve dans cette plage. L'« eau osmotique » (plage A sur la Figure III.8) représente également une part non négligeable de l'eau adsorbée. Il n'y a presque pas d'« eau libre », l'eau adsorbée par les échantillons de craie d'Estreux est essentiellement liée au solide.

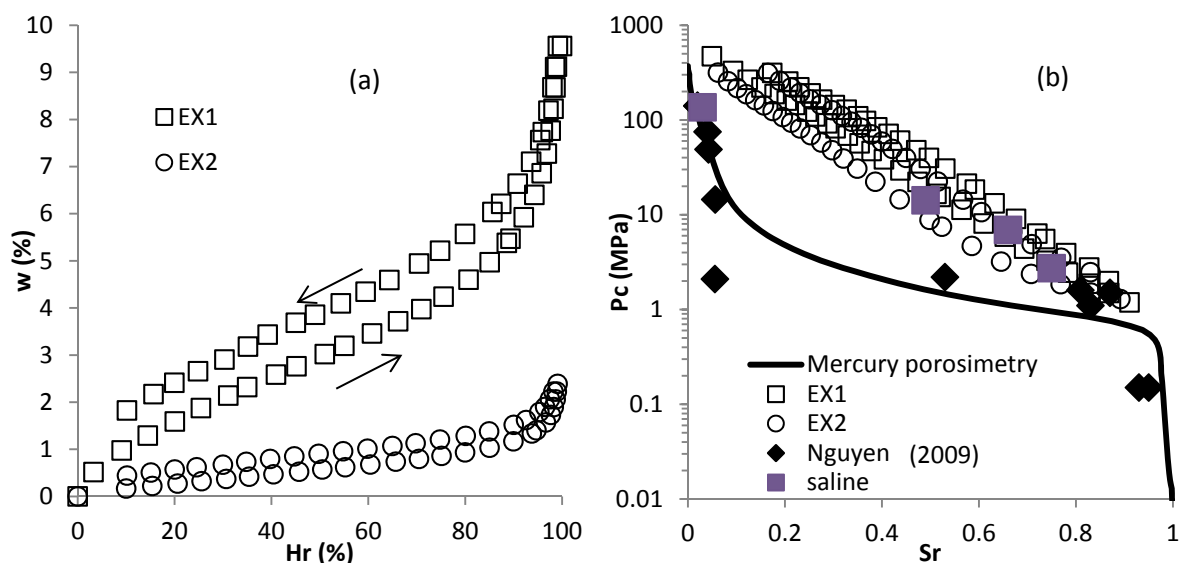


Figure III.9 : Isothermes de sorption (a) obtenues par adsorbmètre et (b) confrontation avec les solutions salines et la porosimétrie au mercure. Craie d'Estreux

Concernant la confrontation porosimétrie/isotherme de sorption (Figure III.9b), la courbe des isothermes s'écarte de la courbe porosimétrique, excepté aux très fortes et très faibles pressions capillaires.

Les deux fluides concernés pour ces courbes de rétention – le mercure et l'eau – n'ont pas les mêmes propriétés physiques et chimiques : le premier est non-mouillant et n'interagit pas chimiquement avec la craie, le deuxième est mouillant et peut réagir chimiquement avec la craie. L'écart est significatif des phénomènes prenant place dans cette craie : là où les phénomènes de rétention du mercure sont des phénomènes capillaires, lorsqu'il s'agit de l'eau il faut impérativement y ajouter les phénomènes d'adsorption. La part de l'un et l'autre dépend entièrement du matériau donc de son réseau poreux et de sa minéralogie. Si les isothermes de sorption sont proches de la courbe porosimétrique, les phénomènes sont essentiellement dus à la capillarité, si les isothermes sont éloignées de la courbe porosimétrique, les phénomènes sont essentiellement dus à l'adsorption (Schroeder 2003).

Dans le cas de la craie d'Estreux, les phénomènes semblent être davantage du ressort de l'adsorption que de la capillarité. Ce comportement est assez similaire à celui des matériaux argileux (Arairo 2013, Mobarek 2013, Guillon 2011, Ta et al. 2008, Nowamooz 2007, Grgic 2001, Delage et Cui 2000). La part importante de glauconie de la craie n'est pas étrangère à la forme des courbes donc à ce type de comportement.

Les interactions eau-craie pour la craie d'Estreux sont donc essentiellement dues à de la physisorption mettant en jeu des liaisons faibles de type Van der Waals. En comparaison de ce que l'on peut trouver pour la craie d'Estreux chez Nguyen 2009, Priol 2005, Priol et al. 2004, leur courbe de rétention d'eau construite à l'aide de la méthode osmotique se superpose avec la courbe porosimétrique traduite en diagramme P_c - S_r . Ce qui implique que la méthode osmotique favorise une réponse « capillaire » au détriment des phénomènes de physisorption. Il faut rester prudent car ce qui vient d'être impliqué ne concerne que ce type de matériau.

- *Cas des craies de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon*

Pour les craies de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon (Figure III.10a et Figure III.11a), les isothermes se reproduisent de manière similaire peu importe l'échantillon considéré.

La configuration des isothermes de sorption est différente de celle d'Estreux, dans le sens où celles-ci présentent un deuxième changement de concavité beaucoup plus prononcé que dans le cas de la craie d'Estreux. La plage « multicouche » représente la plus grande portion de l'isotherme comme pour la craie d'Estreux, cependant la majorité de l'eau adsorbée se situe dans les zones A et B de l'eau liée et dans la zone « eau libre » (particulièrement pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud).

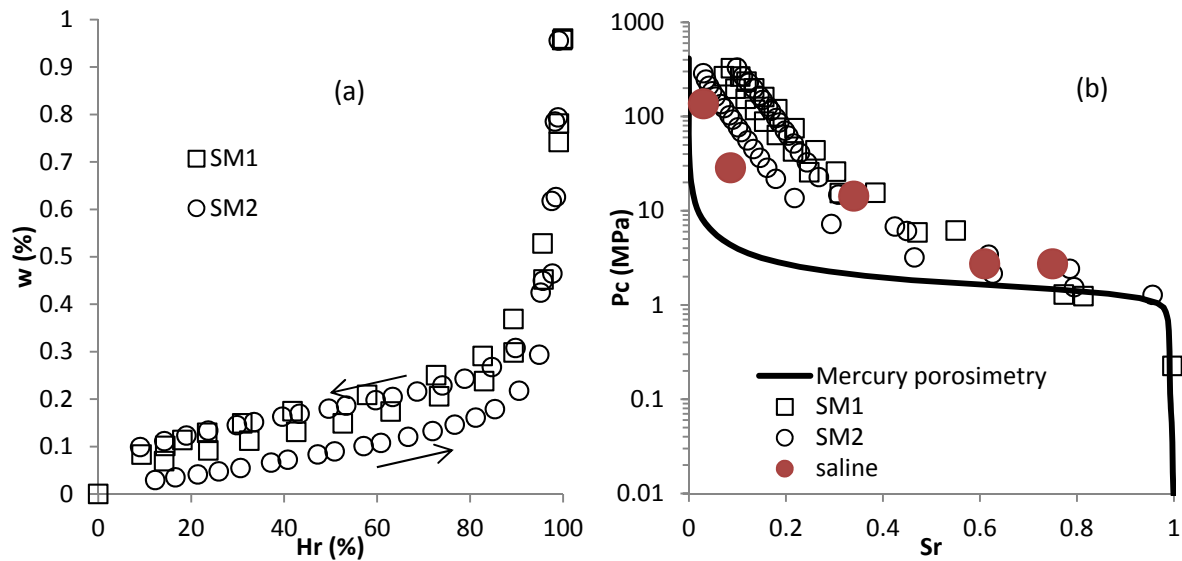


Figure III.10 : Isothermes de sorption (a) obtenues par adsorbmètre et (b) confrontation avec les solutions salines et la porosimétrie au mercure. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

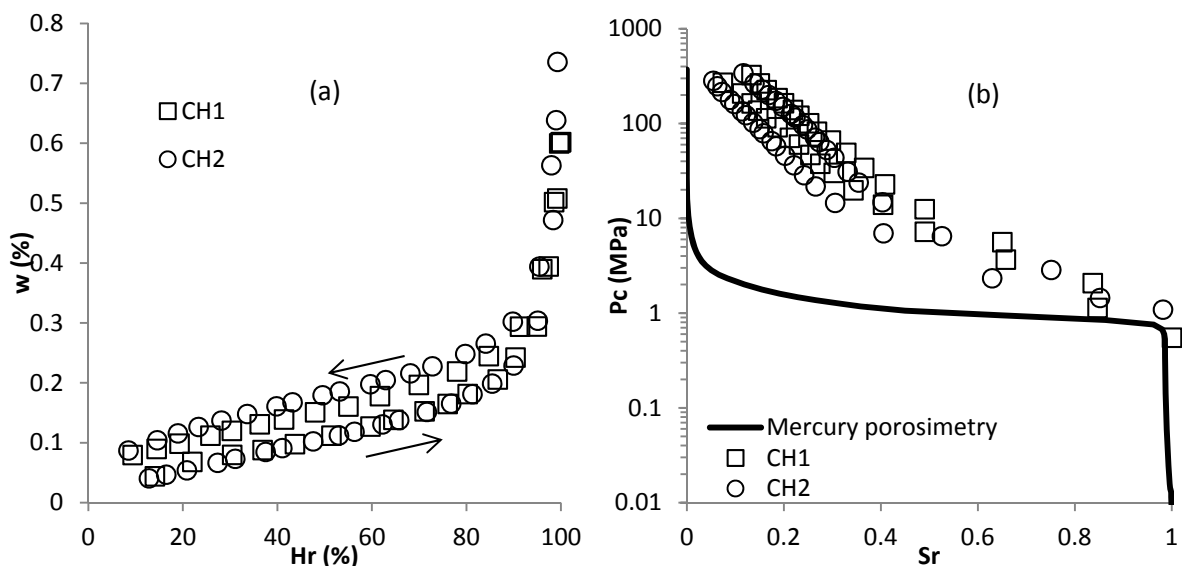


Figure III.11 : Isothermes de sorption (a) obtenues par adsorbmètre et (b) confrontation avec la porosimétrie au mercure. Craie de Château-Landon

Concernant la confrontation porosimétrie/isotherme de sorption pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud (Figure III.10b), la courbe des isothermes s'écarte de la courbe porosimétrique uniquement aux fortes pressions capillaires.

La forme de la courbe est typique de ce que l'on peut trouver dans la littérature sur la craie comme la craie de Lixhe (Schroeder 2003), la craie de Pietra Leccese (Dahou et al. 1995), les craies de Seaford et Lewes (Taibi et al. 2009), etc. La courbe d'imbibition rejoint la courbe porosimétrique pour un degré de saturation de 45 %. Ce qui signifie que la part des phénomènes dus à la capillarité est beaucoup plus importante que dans le cas de la craie d'Estreux. Les interactions eau-craie pour la

craie de Saint-Martin-le-Nœud sont donc dues à de la physisorption et de la capillarité.

Concernant la confrontation porosimétrie/isotherme de sorption pour la craie de Château-Landon (Figure III.11b), la forme de la courbe peut-être définie comme un cas intermédiaire entre les formes des courbes pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud : elle ne possède pas la linéarité de l'isotherme d'Estreux mais elle ne se rapproche pas autant de la courbe porosimétrique que l'isotherme de la craie de Saint-Martin-le-Nœud. Les interactions eau-craie pour la craie de Château-Landon sont donc dues à de la physisorption et de la capillarité, avec une prépondérance de la première sur la deuxième, par rapport au cas de la craie de Saint-Martin-le-Nœud.

III.4. ETUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE À COURT TERME DES CRAIES EN CONDITIONS SATURÉES ET PARTIELLEMENT SATURÉES

III.4.1. Dispositifs et protocoles expérimentaux

III.4.1.1. Instrumentation des échantillons

Les éprouvettes cylindriques utilisées pour les essais de compression uniaxiale et triaxiale, de diamètre $\varnothing=50$ mm et de hauteur $h=100$ mm, ont été instrumentées de manière à pouvoir enregistrer les déformations axiales et latérales durant l'essai. Ces enregistrements sont effectués à l'aide de jauges d'extensométrie. Il s'agit d'une méthode de mesure mout fois éprouvée dans l'étude du comportement mécanique des craies et des géomatériaux en général (Xie 2005, Homand et Shao 2000a, Homand et Shao 2000c, Dahou et al. 1995, Gourri 1991). Les jauges utilisées ont une impédance de 250Ω et la colle utilisée est une colle epoxy. Ces jauges – axiale et latérale – sont collées deux à deux de part et d'autre de l'éprouvette à la moitié de la longueur de l'échantillon.

Les éprouvettes cubiques de $c=50$ mm de côté utilisées pour les essais de compression isotrope, ont été instrumentées à l'aide de jauges d'extensométrie. La manière classique de disposer les jauges est d'en coller une sur chaque face, avec un angle de 90° entre deux jauges de faces opposées. L'utilisation de rosettes – comportant deux jauges d'extensométrie placées à 90° - donc la mobilisation de trois faces au lieu de six a été choisie pour des raisons pratiques. Elles sont placées au centre de chacune des trois faces. La colle utilisée est la même que pour les échantillons cylindriques. L'échantillon est ensuite coulé dans du silasthène. Les éprouvettes cylindriques utilisées pour les essais de traction indirecte, de diamètre $\varnothing=38$ mm et de hauteur $h=76$ mm, n'ont pas été instrumentées. Seule est considérée la moyenne des mesures suivant une direction après élimination éventuelle des valeurs estimées aberrantes (mauvais fonctionnement, rupture prématurée d'une jauge, poinçonnement, ...).

Les essais de compressions uniaxiale et triaxiale sont effectués sur des échantillons secs, saturés et partiellement saturés.

III.4.1.2. Essais de compression uniaxiale

La procédure employée est celle de la norme NF P 94-420. Ce type d'essai donne le comportement mécanique en compression simple suivant l'état hydrique de l'échantillon. Il nécessite l'utilisation d'une presse de capacité 1000 kN. Les modules de déformation axiale et latérale ont été déterminés à partir des courbes contrainte-déformation axiales et latérales.

L'essai est piloté en déformation avec une vitesse de 48 $\mu\text{m}/\text{min}$. Ce choix de vitesse correspond assez bien aux vitesses admissibles pour la craie dans la littérature (Schroeder 2003, Schroeder 2002, Dahou et al. 1995, Gourri 1991). Un comportement post-pic peut éventuellement être enregistré. Les essais mécaniques de compression sont effectués avec des cycles afin de déterminer le module de déformabilité axiale et le coefficient de Poisson statique de la roche (NF P 94-425), caractérisant ainsi sa raideur mais aussi pour évaluer le caractère endommageable de la roche (possible diminution des modules avec les cycles). Les cycles sont initiés tous les 2.5 kN, ce qui équivaut à un cycle tous les 1.3 MPa compte tenu de la géométrie des échantillons testés. Un temps de relaxation de 10 min avant chaque cycle est nécessaire pour laisser le temps à l'énergie accumulée par l'échantillon lors de la sollicitation de se dissiper.

Les essais mécaniques à court terme permettent de déterminer divers paramètres tels que le module de Young E , le module d'élasticité latéral E_{lat} , le coefficient de Poisson ν , le module d'élasticité isostatique K , le premier coefficient de Lamé λ , le module de cisaillement (ou second coefficient de Lamé) G mais également le module d'élasticité de l'enveloppe E_L . Les deux premiers sont directement déterminés à l'aide des courbes contrainte-déformation et le dernier à partir de la partie linéaire correspondant au chemin de déchargement des courbes contrainte-déplacement. Lors d'un cycle, les deux modules E et E_{lat} correspondent au coefficient directeur de la partie linéaire du chemin de déchargement sur les courbes de déformations respectivement axiales et latérales. Les autres sont calculés à partir de ces valeurs de la façon suivante dans le cas d'un matériau homogène et isotrope :

$$\nu = -\frac{E}{E_{lat}} \quad (\text{III.12})$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (\text{III.13})$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{III.14})$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{III.15})$$

D'autres paramètres peuvent être déterminés le cas échéant (Figure III.12), à savoir la fin de la phase de fermeture des microfissures σ_S , le seuil de perte de linéarité de la courbe de déformation latérale σ_{limlat} , le seuil de perte de linéarité de la courbe de déformation axiale σ_{limax} , le seuil de dilatace (ou coalescence) σ_D , la résistance maximale en compression simple R_c ou σ_C , la résistance résiduelle σ_R . Cette dernière peut également être obtenue à partir des courbes contrainte-déplacement. Sur celles-ci, le module de l'enveloppe E_I est déterminé. Les deux seuils de pertes de linéarité σ_{limax} et σ_{limlat} des courbes de déformations axiale et latérale permettront ultérieurement de déterminer le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie (le premier des deux seuil atteint, car nous verrons par la suite que ces craies ne présentent pas d'endommagement¹⁵).

Il est cependant important de préciser que ces valeurs ne sont pas toujours évidentes à déterminer en raison de leur caractère subjectif et de la nature locale des mesures de déformation par les jauges.

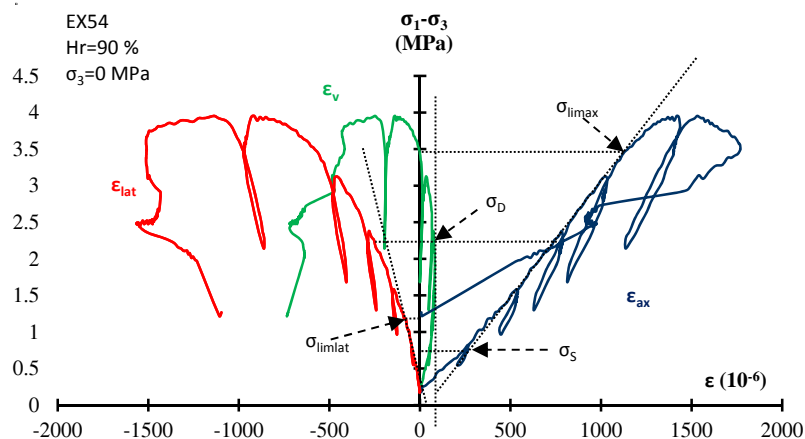


Figure III.12 : Les différents seuils dans le comportement de la craie (diagramme contrainte déformation)

Le maintien de l'état hydrique de l'échantillon s'effectue de différentes façons : si l'échantillon est complètement saturé, un film alimentaire recouvre l'éprouvette et empêche l'eau de s'évaporer. Si l'échantillon n'est que partiellement saturé, celui-ci est placé dans un contenant à base métallique surélevée et parois en plexiglas permettant de placer une solution saline – pour maintenir l'état partiellement saturé de l'échantillon – en dessous de l'échantillon sans que celui-ci ne baigne dedans. Un film alimentaire au-dessus de la cellule en plexiglas assure l'étanchéité.

Les essais sur échantillons sec et saturé ont été effectués sur les trois craies. Les essais sur échantillons partiellement saturés n'ont été effectués que pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud. Aucun résultat d'essais en conditions

¹⁵ L'endommagement désigne l'ensemble des phénomènes de création de nouvelles surfaces libres au sein d'un matériau soumis à une sollicitation d'origine mécanique ou thermique. L'apparition et le développement de ces nouvelles surfaces constituent généralement un phénomène irréversible.

partiellement saturées pour la craie de Château-Landon n'a été obtenu dans le cadre de cette thèse : en raison de son côté pulvérulent, l'instrumentation (ainsi que le suivi d'essai) de cette craie est beaucoup plus laborieuse que pour les deux autres. Les essais effectués sur ces dernières ont, par conséquent, été réalisés en priorité.

III.4.1.3. Essais de compression triaxiale

La procédure employée est celle de la norme NF P 94-423 (essai de compression triaxiale de révolution où $\sigma_2 = \sigma_3 = P_{\text{conf}}$). Ce type d'essai donne le comportement d'une roche soumis à un confinement donné (P_{conf} pression de confinement). L'éprouvette, peu importe son état hydrique, est placée dans une jaquette étanche et souple. Le tout est ensuite placé dans une cellule triaxiale auto compensée.

L'essai est conduit en imposant un chargement hydrostatique $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_{\text{conf}}$ puis la contrainte axiale est augmentée en suivant une consigne de vitesse de déformation de 48 $\mu\text{m}/\text{min}$ jusqu'à la contrainte maximale (rupture) dite résistance à la compression triaxiale R_{tri} . Les deux pressions de confinement utilisées pour les trois craies sont de 1 et 3 MPa, choisies en fonction de l'estimation des contraintes *in situ* dans un pilier (≈ 3.5 MPa). En dehors des résistances à la compression triaxiale, les autres paramètres obtenus à partir de ces essais sont les mêmes que pour les essais de compression uniaxiale.

Les essais sur échantillons partiellement saturés n'ont été effectués que pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Noëud. Les essais sur échantillons sec et saturé ont été effectués sur les 3 craies. Des essais à pression de confinement intermédiaire (0.5 et 1.2 MPa) ont été effectués sur des échantillons saturés de craie de Château-Landon.

III.4.1.4. Essais de compression isotrope

L'essai de compression isotrope consiste à soumettre un échantillon (ici cubique) à un chargement hydrostatique. L'essai consiste à placer l'échantillon sec préalablement instrumenté et recouvert d'une jaquette en silasthène dans une cellule triaxiale auto-compensée permettant ainsi d'assurer le confinement. La capacité maximale de la cellule est de 60 MPa. Les déformations sont enregistrées pendant toute la durée de l'essai. L'essai est piloté avec une vitesse de 0.02 MPa/s.

Ce type d'essai donne, s'ils sont atteints, le seuil de « pore-collapse » P_{col} , un seuil de raidissement P_t et un module de compressibilité K . Il donne également une porosité de fissure n_f naturelle éventuelle. L'écart possiblement existant entre les différentes courbes de contrainte-déformation (donc dans les trois directions) permet de faire état de la possible anisotropie mécanique du matériau.

III.4.1.5. Essais de traction indirecte

La résistance en traction a été déterminée par des essais brésiliens (traction par fendage) selon la norme NF P 94-422. On mesure la résistance à la rupture d'un cylindre de roche comprimé suivant deux génératrices diamétralement opposées.

Les essais sont pilotés en force. Ils n'ont été effectués que sur des échantillons secs, saturés et à une hygrométrie de 98 %.

III.4.2. Résultats et interprétations

III.4.2.1. Synthèse des résultats pour les essais de compressions uniaxiale et triaxiale et de traction

Les particularités du comportement mécanique de chaque craie sont détaillées en fonction du type d'essai dans les paragraphes suivants, et permettront d'établir les critères de rupture (§ III.4.2.2). L'analyse prend aussi bien compte des résultats des jauges que des résultats des capteurs de déplacement. Malheureusement, la détermination du coefficient de Biot et du module de Biot de chaque craie, paramètres essentiels dans l'étude du couplage hydromécanique, n'a cependant pas pu être réalisée au cours de cette thèse, en raison de difficultés expérimentales.

III.4.2.1.1. Essais de compression uniaxiale

Cette partie s'attarde sur les résultats de compression uniaxiale obtenus pour les craies d'Estreux, de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon.

La Figure III.13 présente les diagrammes contrainte-déplacement en fonction de l'hygrométrie pour les craies d'Estreux et de Saint-martin-le-Nœud pour les résultats de compression uniaxiale.

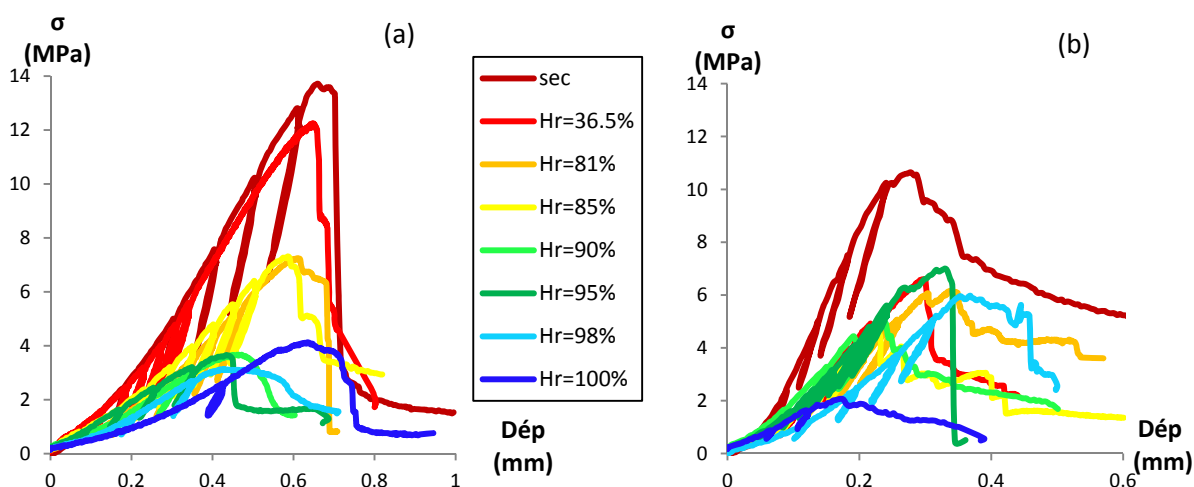


Figure III.13 : Diagramme contrainte-déplacement en fonction de l'hygrométrie. Essais de compression uniaxiale. Craies (a) d'Estreux et (b) de Saint-Martin-le-Nœud

De la Figure III.13 découle plusieurs choses : les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud ont des comportements globalement similaires mais avec quelques différences.

Pour la craie glauconieuse (Figure III.13a), la résistance au pic et la pente de la courbe contrainte-déplacement diminuent pour une augmentation de l'hygrométrie. La craie se déforme beaucoup avant d'atteindre la rupture (max=0.7 mm – min=0.48 mm). Les courbes peuvent être regroupées en 4 groupes suivant la

similarité de leur forme (pente, maximum, etc.) : les échantillons sec et à Hr=36.5 %, les échantillons à Hr=81 % et Hr=85 %, les échantillons à Hr=90 %, Hr=95 % et Hr=98 %, puis l'échantillon entièrement saturé. Presque tous les échantillons ont présenté un comportement post-pic radoucissant avec une contrainte résiduelle comprise entre 1 et 4 MPa et ce peu importe l'hygrométrie.

Pour la craie dolomitique (Figure III.13b), la résistance au pic diminue globalement avec une augmentation de l'hygrométrie. La craie se déforme peu avant d'atteindre la rupture (max=0.35 mm, la moitié du déplacement maximal d'Estreux – min=0.2 mm). Néanmoins la pente des courbes ne suit pas forcément cette tendance. Les courbes peuvent être regroupées en 3 groupes suivant leur valeur de pente : l'échantillon sec, les échantillons à Hr=36.5 %, Hr=81 %, Hr=85 %, Hr=90 % et Hr=95 %, puis les échantillons entièrement saturés et à Hr=98 %. Il n'a pas été établi de réelle tendance du comportement post-pic (radoucissant ici) en fonction de l'hygrométrie.

Le Tableau III.5 présente les caractéristiques mécaniques des échantillons de craies de Saint-Martin-le-Nœud et d'Estreux soumis à des essais de compression uniaxiale et à hygrométrie contrôlée. Il présente les différents seuils obtenus (s'ils sont atteints) pour chaque essai, à savoir la fin de la phase de fermeture des microfissures σ_S , la limite élastique σ_L , le seuil de dilatance (ou coalescence) σ_D , la résistance maximale en compression simple σ_C , la résistance résiduelle σ_R . Il présente également les paramètres mécaniques obtenus à partir des cycles (moyennes et écart-types), à savoir le module de Young E , le coefficient de Poisson ν et le module d'élasticité de l'enveloppe E_L . Les valeurs des paramètres mécaniques présentés ici sont des moyennes de valeurs déterminées à partir de l'étude de leur évolution en fonction du nombre de cycles (donc de la contrainte appliquée puisque chaque cycle est initié tous les 2.5 kN après 10 min de relaxation).

Les Figure III.14 et Figure III.17 présentent des exemples de courbes contrainte-déformation obtenus à partir des essais de compression uniaxiale avec cycles pour chaque craie. Les Figure III.15 et Figure III.18 présentent l'évolution des paramètres élastiques (E et ν) en fonction des cycles (rapports E_{i+1}/E_i et ν_{i+1}/ν_i avec i n° de cycle). Les Figure III.16 et Figure III.19, quant à elles, sont des photographies de quelques échantillons après leur rupture.

La craie de Château-Landon n'a pas été traitée de la même manière que les deux autres : la préparation et l'instrumentation des échantillons de cette craie sont laborieuses et très chronophages et ce, en raison de son côté pulvérulent. L'expérimentation à hygrométrie contrôlée sur les deux autres craies a été privilégiée dans le cadre de cette thèse. Le Tableau III.6 présente les caractéristiques de cette troisième craie aux états sec et saturé. La dénomination est la même que pour le Tableau III.5. Les Figure III.20 et Figure III.21 présentent respectivement les courbes contrainte-déformation d'échantillons secs et saturés, ainsi que les formes de rupture.

Tableau III.5 : Caractéristiques mécaniques des craies de Saint-Martin-le-Nœud et d'Estreux en fonction de l'hygrométrie.
Compressions uniaxiales

éch.	SM5	SM8	SM50	SM31	SM45	SM46	SM48	SM49	SM53	SM54	SM55	SM1	SM2														
Hr %	100	100	100	100	98	98	95	90	85	81	36.5	SEC	SEC														
Prog	Autocycle	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Autocycle	Autocycle														
σ_3 (MPa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0														
σ_c (MPa)	7.8	3.4	2.0	2.5	5.4	5.8	7.0	4.9	4.8	6.1	6.6	10.9	11.4														
σ_s (MPa)	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7	5.1														
σ_D (MPa)	-	-	-	-	-	2.5	-	-	-	-	-	-	-														
σ_R (MPa)	-	-	-	-	2.4	2.8	0.5	2.3	1.5	4.3	-	-	-														
σ_L (MPa)	6.9	-	-	-	2.2	1.9	2.9	-	-	-	-	8.8	4.4														
Para. Méca.	E	11.33±0.49	E	Pas de jauges	E	4.92±0.80	E	Problème de capteurs	E	10.85±0.78	E	13.15±0.76	E	7.60±0.59	E	9.90±1.27	E	7.80±0.11	E	7.40±0.13	E	6.96±0.03	E	10.03±0.38	E	9.30±0.16	
	v	0.18±0.01	v		v	0.21±0.07	v		0.34±0.09	v	0.24±0.04	v	0.20±0.03	v	0.27±0.01	v	0.27±0.01	v	0.21±0.01	v	0.18±0.01	v	0.18±0.01	v	0.21±0.01	v	0.21±0.01
	E _L	7.53±0.57	E _L		E _L	2.81±0.68	E _L		3.67±0.75	E _L	4.78±1.00	E _L	3.85±0.44	E _L	3.56±0.20	E _L	3.51±0.63	E _L	3.22±0.70	E _L	3.89±0.68	E _L	3.89±0.68	E _L	8.40±1.43	E _L	8.34±1.14

éch.	EX5	EX8	EX30	EX26	EX43	EX45	EX55	EX54	EX56	EX58	EX62	EX1	EX2													
Hr %	100	100	100	100	98	98	95	90	85	81	36.5	SEC	SEC													
Prog	Autocycle	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Autocycle	Autocycle													
σ_3 (MPa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0													
σ_c (MPa)	4.0	5.7	4.9	4.8	3.8	3.1	3.6	3.9	7.3	7.2	12.2	13.9	12.6													
σ_s (MPa)	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.2	3.6													
σ_D (MPa)	2.2	-	2.4	3.6	2.7	1.9	1.1	1.9	3.5	5.9	-	10.7	10.1													
σ_R (MPa)	0.7	-	1.4	0.8	1.5	1.6	1.6	2.5	3.1	0.8	-	13.5	11.9													
σ_L (MPa)	1.0	-	1.1	1.2	0.9	1.0	1.1	1.2	2.5	-	6.5	1.3	2.4													
Para. méca.	E	4.40	E	Pas de jaug	E	4.88±2.30	E	2.86±0.88	E	3.12±0.66	E	3.48±0.65	E	3.47±0.19	E	5.06±0.51	E	6.66±0.96	E	5.04±0.68	E	5.64±0.30	E	7.54±0.54	E	7.08±0.66
	v	0.33	v		v	0.29±0.17	v	0.13±0.07	v	0.12±0.06	v	0.26±0.10	v	0.35±0.09	v	0.31±0.09	v	0.31±0.10	v	0.23±0.05	v	0.20±0.03	v	0.25±0.06	v	0.25±0.05
	E _L	2.17	E _L		E _L	2.25±0.57	E _L	2.45±0.63	E _L	2.34±0.32	E _L	2.11±0.40	E _L	2.31±0.21	E _L	2.79±0.42	E _L	3.46±0.48	E _L	3.59±0.49	E _L	3.41±1.02	E _L	6.19±1.24	E _L	6.00±0.61

Remarque : Les paramètres mécaniques correspondent aux moyennes et écart-types de tous les cycles. Les seuils correspondent à la valeur de la contrainte appliquée.

Le détail des valeurs à chaque cycle, la moyenne de tous les cycles et l'écart-type sont présentés dans les tableaux correspondants en Annexe B. L'évolution des paramètres E , ν , G , K , λ et E_L en fonction des cycles est présentée en Annexe B sous forme de diagrammes paramètre – n° de cycle. L'ensemble des courbes contrainte-déplacement et contrainte-déformation, accompagnées des photographies de l'échantillon correspondant après rupture, est également consigné en Annexe B.

○ *Craie dolomitique de Saint-Martin-le-Noëud*

Sans confinement, la craie dolomitique voit sa résistance en compression diminuer globalement en fonction de l'hygrométrie (présence de paliers). Plusieurs courbes contrainte-déformation sont présentées en Figure III.14 pour différentes hygrométries. Selon ces courbes, la craie dolomitique ne présente pas ou très peu de dilatance : la rupture prend place toujours avant qu'un phénomène de dilatance ne puisse se mettre en place. De même, on observe peu d'apparition des seuils de plasticité. Si ces seuils sont observés, ils précèdent d'assez près le seuil de rupture. La résistance résiduelle n'est quant à elle pas corrélée avec l'hygrométrie. Tout cela amène l'hypothèse d'une rupture de type fragile.

Pour ce qui est du déroulement des essais eux-mêmes, le module de Young ne varie pas (ou très peu) en fonction des cycles, et ce, peu importe l'hygrométrie (voir les Figure III.14 et Figure III.15). Les seules différences notables peuvent être observées entre le 1^{er} et le 2^e cycle (différence de ≈ 1 GPa).

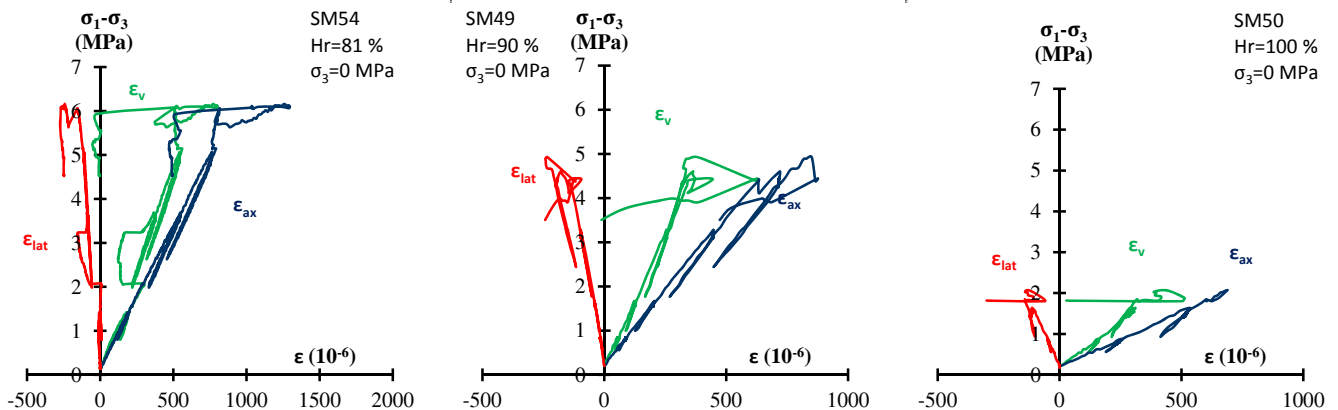


Figure III.14 : Exemples de courbes contrainte-déformation de trois essais de compression uniaxiale en fonction de l'hygrométrie. Craie de Saint-Martin-le-Noëud

Cependant, il n'existe pas de réelle évolution du module de Young en fonction de l'hygrométrie : celui-ci varie de 4.92 GPa à 13.15 GPa indépendamment de l'état de saturation. La variabilité de ce paramètre semble être donc davantage due à l'échantillon qu'à l'hygrométrie imposée (ou à l'état de saturation) puisque pour une même hygrométrie (sec, 98 % ou 100 %) l'écart est assez important. Le coefficient de Poisson varie de manière un peu plus chaotique que le module de Young en fonction des échantillons (de 0.18 à 0.34) mais suit la même évolution que le module de Young. Ce n'est qu'à partir du 3^e cycle pour un des échantillons à Hr=98 % et

l'échantillon à 95 % qu'on observe une certaine différence. La même remarque sur les raisons de la variabilité aléatoire du paramètre due à l'échantillonnage peut être faite.

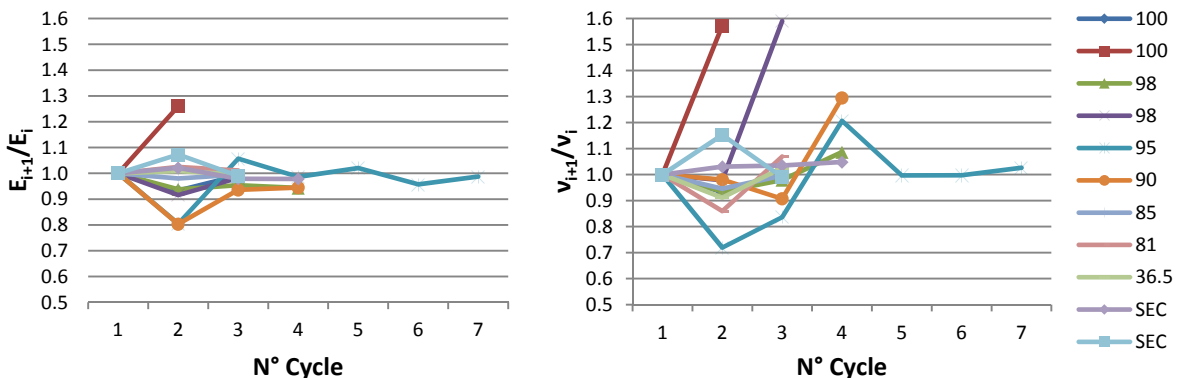


Figure III.15 : Rapports E_{i+1}/E_i et v_{i+1}/v_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=0$ MPa) pour la craie de Saint-Martin-le-Noëud

Néanmoins, du fait de la non (ou très faible) variabilité de ces paramètres en fonction des cycles, l'hypothèse d'un comportement élasto-fragile sans confinement est fortement appuyée pour la craie de Saint-Martin-le-Noëud. Le module de l'enveloppe, en général ne varie pas en fonction de l'hygrométrie mais tend à augmenter avec les cycles jusqu'à se stabiliser.

La forme de la rupture (photographies en Figure III.16) est presque exclusivement composée de fractures longitudinales. Il n'y a que pour les échantillons SM49 (Hr=90 %) et SM50 (Hr=100 %) que la rupture suit un plan de cisaillement.



Figure III.16 : Photographies d'échantillons après essai de compression uniaxiale en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Echantillons placés initialement à des hygrométries respectives de 36 %, 90 % et 100 %.

Craie de Saint-Martin-le-Noëud

○ Craie glauconieuse d'Estreux

Sans confinement, la craie glauconieuse voit sa résistance en compression diminuer en fonction de l'hygrométrie et ce de manière plus claire que pour la craie dolomitique. Elle présente presque toujours de la dilatance avec des seuils d'entrée en plasticité assez bas (voir Figure III.17). Cependant l'évolution de leur valeur ne semble pas corrélée avec l'hygrométrie : celle-ci reste relativement constante. Le seuil de dilatance suit la même tendance que la valeur du pic de rupture. L'écart entre ces deux seuils est d'ailleurs relativement constant d'une hygrométrie à l'autre. Tout cela amène l'hypothèse d'un comportement plutôt ductile.

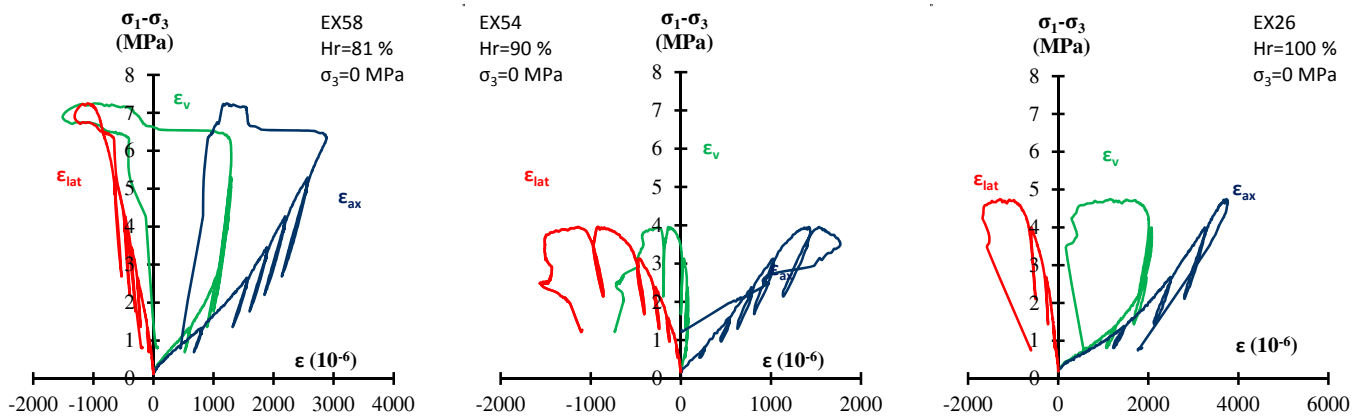


Figure III.17 : Exemples de courbes contrainte-déformation de trois essais de compression uniaxiale en fonction de l'hygrométrie. Craie d'Estreux

Pour ce qui est du déroulement des essais en eux-mêmes, le module de Young, tout comme le coefficient de Poisson, a tendance à augmenter en fonction des cycles (voir les Figure III.17 et Figure III.18). La craie a donc tendance à se raidir au cours de l'essai. Cette variation est particulièrement importante lorsque l'échantillon est placé à une hygrométrie supérieure ou égale à 98 %. Le module de Young pour les autres échantillons présente une variation moins marquée mais similaire pour chaque hygrométrie.

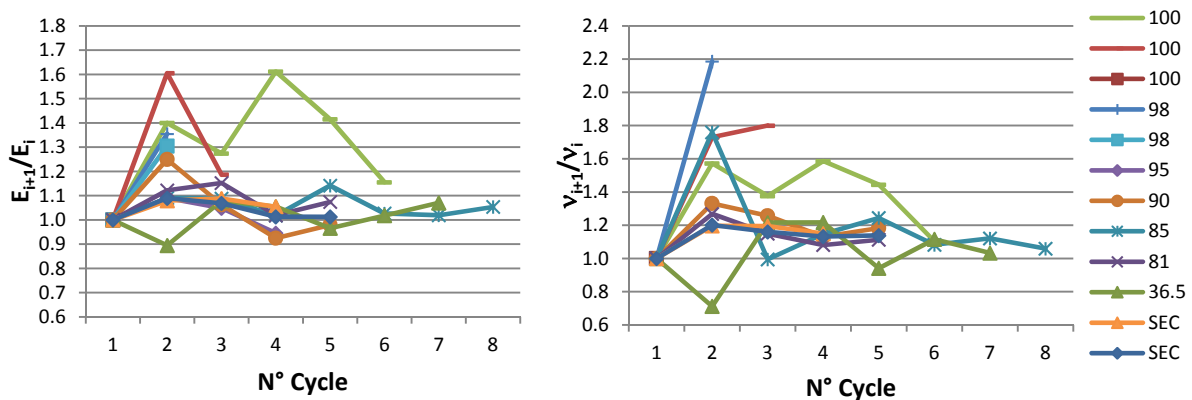


Figure III.18 : Rapports E_{i+1}/E_i et ν_{i+1}/ν_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=0$ MPa) pour la craie d'Estreux

Le module de Young et le coefficient de Poisson varient également en fonction de l'hygrométrie : de manière générale, plus l'hygrométrie est importante plus le module de Young et le coefficient de Poisson sont faibles (rapport allant de 1 à 3 pour E et 1 à 2 pour ν entre les états sec et saturé). On peut séparer les échantillons en fonction de la valeur de E au premier cycle : pour $H_r=36.5\%$ et $H_r=90\%$ $E \approx 5$ GPa, pour les échantillons secs $E \approx 6.5$ GPa, pour à $H_r=95\%$ ou 98% $E \approx 3$ MPa et pour les échantillons saturés $E \approx 2$ MPa.

Pour le coefficient de Poisson, c'est davantage son évolution au cours des cycles qui discrimine les échantillons les uns des autres : l'évolution est d'autant moins marquée que l'hygrométrie est importante. Le module de l'enveloppe quant à lui augmente en fonction des cycles jusqu'à se stabiliser et est d'autant plus faible que l'hygrométrie est grande. L'hypothèse d'un comportement ductile sans confinement est fortement appuyée.

Les éprouvettes rompent principalement en cisaillement (photographies en Figure III.19), et ce plan est de moins en moins visible sur l'éprouvette au fur et à mesure que l'hygrométrie augmente.



Figure III.19 : Photographies d'échantillons après essai de compression uniaxiale en fonction de l'état hydrique et formes de rupture. Échantillons placés initialement à des hygrométries respectives de 36 %, 90 %, 95 % et 100 %. Craie d'Estreux

○ Craie de Château-Landon

Les résultats présentés dans le Tableau III.6 reflètent la complexité d'instrumentation des échantillons de cette craie. Cette observation est d'autant plus flagrante pour les échantillons saturés et ce, peu importe le confinement. À l'état saturé, les jauges ont tendance à se décoller. Par conséquent, il convient de rester prudent sur les valeurs apportées par les jauges, en particulier pour la valeur des paramètres mécaniques, et ce quelle que soit l'état hydrique. Sans confinement et dans l'état sec, la craie de Château-Landon présente un comportement de type élasto-plastique (Figure III.20). La rupture cependant se présente exclusivement sous forme de fractures longitudinales (Figure III.21) et le comportement post-pic par un écrouissage radoucissant. Le module de Young est faible (≈ 5 GPa), la contrainte à la rupture de 4.5 MPa et l'entrée en plasticité plutôt faible (≈ 1.6 MPa).

La craie de Château-Landon est un peu différente de ses comparses dans le sens où la saturation d'un échantillon fait brutalement chuter sa résistance à la compression uniaxiale : la résistance uniaxiale passe d'une valeur de 4.5 MPa à une valeur de 0.8 MPa. Néanmoins, lorsque le matériau est saturé, la forme de la rupture n'est pas aussi nette, la craie s'écrase, le matériau rentre en plasticité rapidement et présente de la dilatance avant la rupture.

Tableau III.6 : Caractéristiques mécaniques de la craie de Château-Landon. Compressions uniaxiales et triaxiales. Etats sec et saturé

éch.	CH1		CH2		CH3		CH13		CH4		CH14	
Hr %	SEC		SEC		SEC		SEC		SEC		SEC	
Prog	Autocycle		Autocycle		Autocycle		Relax 48		Autocycle		Relax 48	
σ_3 (MPa)	0		0		1		1		3		3	
Rc (MPa)	4.5		4.5		5.5		5.3		14.0		5.6	
σ_s (MPa)	1.5		1.1		0.8		1.3		1.5		2.1	
σ_D (MPa)	-		-		-		3.9		-		5.0	
σ_R (MPa)	1.0		1.5		3.3		5.0		-		5.5	
σ_L (MPa)	1.6		2.3		4.0		3.0		5.3		1.8	
Para. Méca.	E	4.80	E	5.70	E	8.60	E	7.15±0.21	E	23.20±12.12	E	9.10±1.56
	v	0.24	v	0.23	v	0.16	v	0.29±0.05	v	0.24±0.03	v	-
	E _L	3.91	E _L	4.29	E _L	5.53	E _L	3.42±0.85	E _L	16.39±11.79	E _L	5.05±1.03

éch.	CH5		CH6		CH8		CH10		CH7		CH9		CH11	
Hr %	SAT		SAT		SAT		SAT		SAT		SAT		SAT	
Prog	Autocycle		Autocycle		Autocycle		Autocycle		Autocycle		Autocycle		Autocycle	
σ_3 (MPa)	0		0.5		0.5		1		1.2		1.2		3	
Rc (MPa)	0.8		1.7		1.6		3.7		1.7		2.3		2.8	
σ_s (MPa)	0.4		-		-		-		1.1		-		-	
σ_D (MPa)	0.7		-		-		-		-		-		-	
σ_R (MPa)	0.4		-		-		-		-		-		-	
σ_L (MPa)	0.7		2.5		-		-		-		-		-	
Para. Méca.	E	Pas de cycles	E	5.70	E	Pb de jauges	E	Pb de jauges	E	Pb de jauges	E	Pb de jauges	E	Pb de jauges
	v		v	0.23	v		v		v		v		v	
	E _L		E _L	1.72	E _L		E _L		E _L		E _L		E _L	

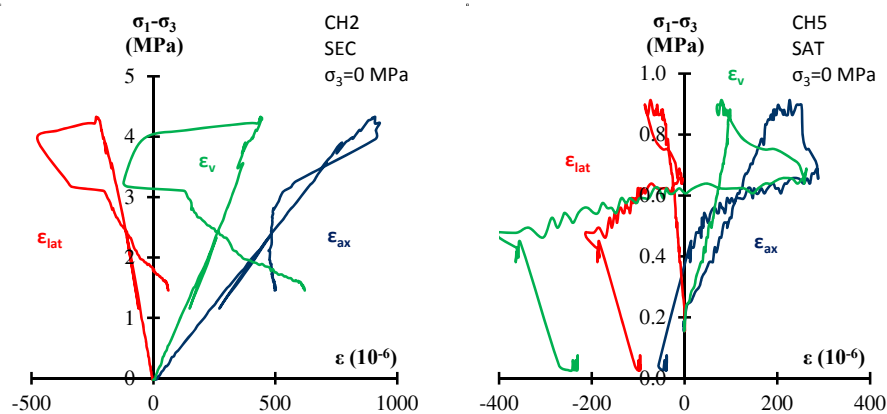


Figure III.20 : Exemples de courbes contrainte-déformation de deux essais de compression uniaxiale dans les états sec et saturé. Craie de Château-Landon

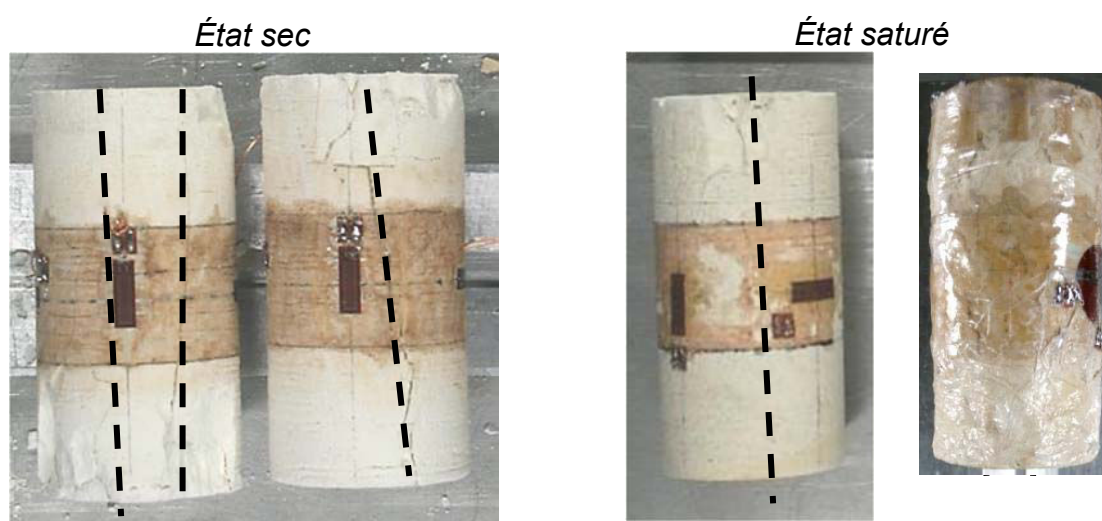


Figure III.21 : Photographies d'échantillons après essai de compression simple, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie de Château-Landon

III.4.2.1.2. Essais de compression triaxiale

Cette partie porte sur les résultats de compression triaxiale obtenus pour les craies d'Estreux, de Saint-Martin-le-Noëud et de Château-Landon.

Les Tableau III.7 et Tableau III.8 présentent les caractéristiques mécaniques des échantillons de craies de Saint-Martin-le-Noëud et d'Estreux soumis à des essais de compression triaxiale (respectivement 1 MPa et 3 MPa de confinement) et à hygrométrie contrôlée. Il présente les différents seuils obtenus (s'ils sont atteints) pour chaque essai les paramètres mécaniques obtenus à partir des cycles (moyennes et écart-types) comme dans le Tableau III.5. Les Figure III.22 et Figure III.25 présentent des exemples de courbes contrainte-déformation obtenus à partir des essais de compression triaxiale avec cycles pour chaque craie. Les Figure III.23 et Figure III.26 présentent l'évolution des paramètres élastiques (E et ν) en fonction des cycles (rapports E_{i+1}/E_i et ν_{i+1}/ν_i avec i n° de cycle). Les Figure III.24 et Figure III.27 quant à elles sont des photographies de quelques échantillons après la rupture.

**Tableau III.7 : Caractéristiques mécaniques des craies de Saint-Martin-le-Nœud et d'Estreux en fonction de l'hygrométrie.
Compressions triaxiales à 1 MPa de confinement**

éch.	SM6	SM9	SM42	SM44	SM43	SM57	SM52	SM58	SM3	SM11										
Hr %	100	100	98	95	90	85	81	36.5	SEC	SEC										
Prog	Autocycle	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Autocycle	Relax48										
L (mm)	99.54	99.55	99.22	99.52	99.48	99.44	99.67	99.44	99.52	99.84										
σ_3 (MPa)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1										
R _{tri} (MPa)	8.7	6.5	6.3	9.1	11.3	10.2	8.5	11.9	15.5	9.8										
R _s (MPa)	1.1	2.3	-	-	-	-	-	-	1.4	2.6										
R _D (MPa)	7.5	5.7	4.4	4.6	-	-	-	-	-	6.7										
R _R (MPa)	7.3	5.5	5.4	7.3	7.8	8.2	8.1	9.7	13.9	8.3										
R _L (MPa)	4.0	3.9	2.6	3.9	5.6	-	4.7	-	11.6	6.9										
Para. méca.	E	19.88±9.34	E	9.40±0.57	E	8.54±1.63	E	14.08±4.66	E	13.57±0.56	E	9.63±0.93	E	8.70±0.87	E	8.52±0.38	E	11.12±1.22	E	13.05±0.07
	v	0.22±0.06	v	0.32±0.01	v	0.35±0.07	v	0.42±0.05	v	0.17±0.01	v	0.24±0.03	v	0.25±0.01	v	0.23±0.02	v	0.19±0.01	v	0.30±0.12
	E _L	10.93±4.35	E _L	4.71±0.01	E _L	5.31±0.15	E _L	6.24±0.46	E _L	5.47±0.62	E _L	4.57±0.61	E _L	4.37±0.54	E _L	4.50±0.71	E _L	8.33±0.23	E _L	5.62±0.40
éch.	EX6	EX9	EX42	EX40	EX50	EX52	EX61	EX60	EX3	EX11										
Hr %	100	100	98	95	90	85	81	36.5	SEC	SEC										
Prog	cycle 50	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Cycle 50	Relax 48										
L (mm)	99.43	99.86	99.65	99.70	99.73	99.71	99.58		99.43	99.54										
σ_3 (MPa)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1										
R _{tri} (MPa)	10.0	8.5	6.0	5.9	9.0	9.1	13.2		18.9	16.7										
R _s (MPa)	1.3	1.0	-	-	-	-	-		3.4	2.7										
R _D (MPa)	8.3	-	4.8	3.2	8.2	8.7	8.5		16.2	-										
R _R (MPa)	8.2	6.3	5.4	5.2	7.9	8.9	10.3		12.0	10.7										
R _L (MPa)	2.3	2.0	2.4	2.0	4.0	3.0	7.2		2.5	2.5										
Para. méca.	E	4.48±0.46	E	6.20±0.35	E	5.63±0.57	E	6.49±1.08	E	8.47±2.16	E	6.49±1.73	E	9.76±1.28	E	-	E	11.78±2.45	E	9.72±1.14
	v	0.25±0.03	v	0.21±0.02	v	0.29±0.06	v	0.31±0.07	v	0.28±0.02	v	0.23±0.05	v	0.28±0.07	v	-	v	0.24±0.05	v	0.23±0.06
	E _L	3.96±0.32	E _L	3.79±0.33	E _L	3.71±0.17	E _L	3.96±0.30	E _L	4.03±0.60	E _L	3.50±0.52	E _L	4.77±0.71	E _L	-	E _L	8.06±1.06	E _L	4.86±0.69

Remarque : Les paramètres mécaniques correspondent aux moyennes et écart-types de tous les cycles. Les seuils correspondent à la valeur du déviateur appliqué.

Tableau III.8 : Caractéristiques mécaniques des craies de Saint-Martin-le-Nœud et d'Estreux en fonction de l'hygrométrie.
Compressions triaxiales à 3 MPa de confinement

éch.	SM7	SM10	SM40	SM41	SM47	SM51	SM56	SM59	SM4	SM12										
Hr %	100	100	98	95	90	85	81	36.5	SEC	SEC										
Prog	Autocycle	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Autocycle	Relax48										
L (mm)	99.53	99.69	92.02	94.70	94.26	99.68	99.22	99.46	99.58	99.58										
σ_3 (MPa)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3										
R _{tri} (MPa)	14.9	10.3	6.8	7.6	10.5	11.1	13.4	13.2	25.2	8.8										
R _s (MPa)	-	1.2	-	-	-	-	-	-	3.7	1.6										
R _D (MPa)	11.7	8.9	-	-	-	-	-	-	23.7	7.3										
R _R (MPa)	14.1	9.8	6.5	-	10.0	9.9	12.5	12.3	-	8.2										
R _L (MPa)	8.0	7.9	2.3	3.5	7.4	-	3.3	11.3	7.5	6.0										
Para. méca.	E	19.76±8.49	E	21.77±4.20	E	20.13±10.24	E	12.42±3.93	E	9.39±1.63	E	11.06±3.22	E	11.93±3.33	E	10.71±3.25	E	33.63±15.38	E	11.55±2.19
	v	0.27±0.03	v	0.22±0.02	v	0.25±0.08	v	0.26±0.05	v	0.17±0.04	v	0.26±0.03	v	0.21±0.08	v	0.27±0.01	v	0.26±0.04	v	0.17±0.07
	E _L	11.68±2.74	E _L	7.16±0.42	E _L	7.77±1.15	E _L	5.19±0.77	E _L	5.73±0.55	E _L	5.51±0.36	E _L	5.24±0.94	E _L	5.27±0.25	E _L	15.19±5.15	E _L	6.71±0.16

éch.	EX7	EX10	EX44	EX41	EX51	EX53	EX57	EX59	EX4	EX12										
Hr %	100	100	98	95	90	85	81	36.5	SEC	SEC										
Prog	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Autocycle	Relax 48										
L (mm)	99.51	99.68	99.11	99.33	99.30	99.76	99.54	99.54	99.47	99.74										
σ_3 (MPa)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3										
R _{tri} (MPa)	15.3	11.1	7.6	7.0	12.9	10.3	14.1	14.8	25.7	20.6										
R _s (MPa)	3.1	1.3	-	-	-	-	-	-	5.5	3.5										
R _D (MPa)	14.9	9.8	4.3	6.0	-	-	7.5	12.4	23.8	-										
R _R (MPa)	14.9	10.0	-	-	-	-	12.4	14.5	23.2	16.1										
R _L (MPa)	7.6	2.8	1.8	2.1	6.7	5.3	3.3	5.1	5.0	5.6										
Para. méca.	E	22.76±12.02	E	11.25±3.30	E	9.56±1.56	E	8.10±1.06	E	12.12±6.04	E	12.51±8.71	E	12.00±2.35	E	20.02±9.55	E	18.96±11.93	E	12.53±3.83
	v	0.28±0.09	v	0.29±0.04	v	0.43±0.05	v	0.34±0.06	v	0.22±0.03	v	0.23±0.04	v	0.29±0.05	v	0.25±0.02	v	0.17±0.16	v	0.27±0.04
	E _L	10.06±4.35	E _L	5.32±1.66	E _L	5.03±0.57	E _L	4.90±0.21	E _L	5.77±0.71	E _L	4.58±0.29	E _L	5.16±0.35	E _L	7.83±1.92	E _L	10.24±3.73	E _L	6.06±0.28

Remarque : Les paramètres mécaniques correspondent aux moyennes et écart-types de tous les cycles. Les seuils correspondent à la valeur du déviateur appliqué.

Pour la craie de Château-Landon, les caractéristiques aux états sec et saturé sont déjà présentées dans le Tableau III.6. Les Figure III.28 et Figure III.29 présentent respectivement les courbes contrainte-déformation d'échantillons secs et saturés, ainsi que les formes de rupture. Le détail des valeurs à chaque cycle, la moyenne de tous les cycles et l'écart-type sont présentés dans les tableaux correspondants en Annexe B. L'évolution des paramètres E , ν et E_L en fonction des cycles est présentée en Annexe B sous forme de diagrammes paramètre-n° de cycle. L'ensemble des courbes contrainte-déplacement et contrainte-déformation, accompagnées des photographies de l'échantillon correspondant après rupture, est également consigné en Annexe B.

○ Craie dolomitique de Saint-Martin-le-Noëud

Avec un confinement de 1 MPa, les échantillons de craie dolomitique placés à une hygrométrie supérieure à 90 % présentent tous un seuil de dilatance avant la rupture. L'écart entre ce seuil et la rupture est d'autant plus espacé que l'hygrométrie est faible. Tous les échantillons présentent un comportement post-pic assez proche de la valeur au pic. Celui-ci diminue globalement avec l'augmentation de l'hygrométrie (au même titre que la résistance au pic). Les seuils de dilatance et la contrainte résiduelle ont la même valeur pour les échantillons saturés.

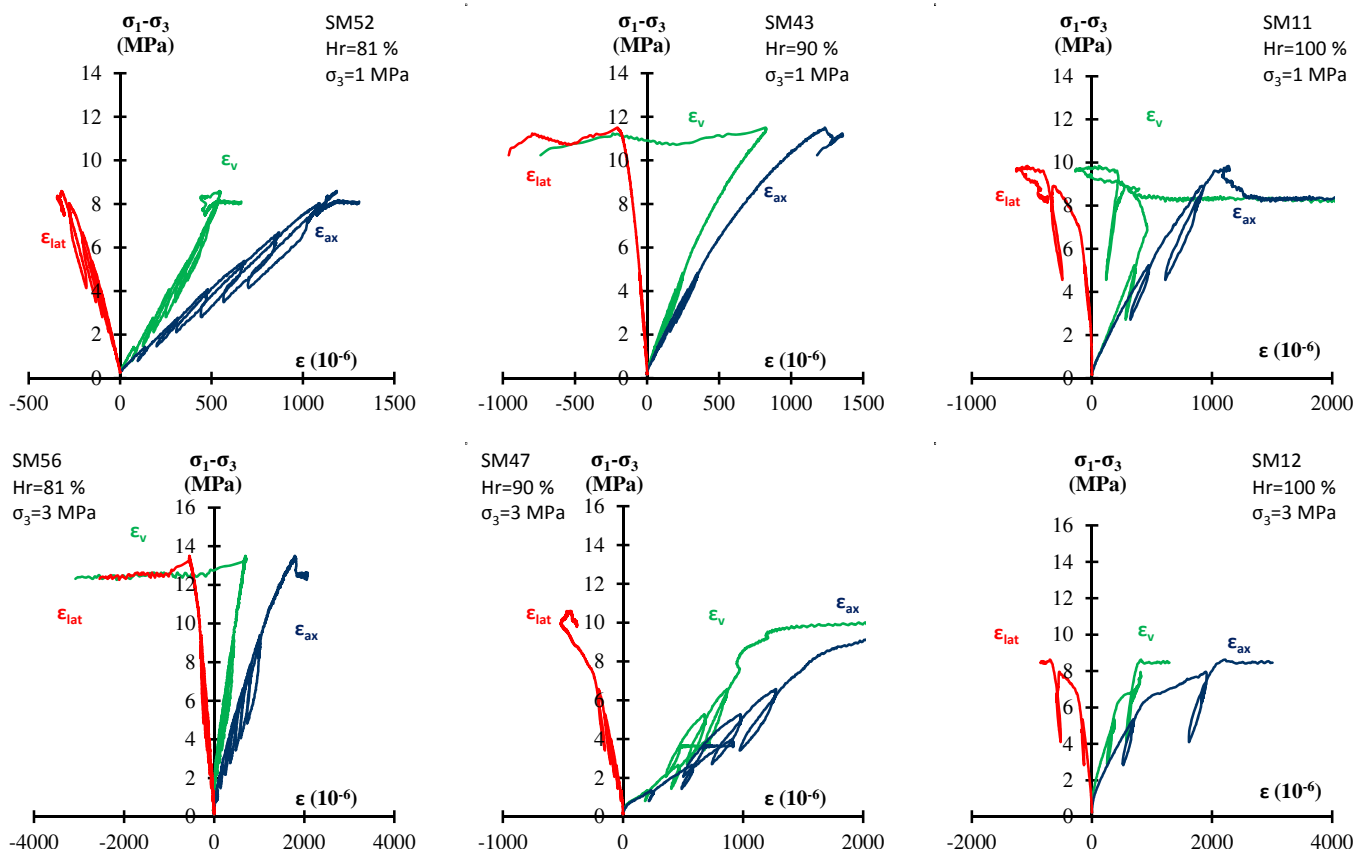


Figure III.22 : Exemples de courbes contrainte-déformation de six essais de compression triaxiale en fonction de l'hygrométrie. 1 MPa et 3 MPa de confinement. Craie de Saint-Martin-le-Noëud

Pour ce qui est du déroulement des essais en eux-mêmes (voir Figure III.23), le module de Young ne varie pas en fonction des cycles et ce quelle que soit l'hygrométrie, sauf pour un échantillon saturé et l'échantillon placé à Hr=95 % qui eux présentent une très forte diminution lors des trois premiers cycles (le module passe de 40 GPa à 15 GPa entre le 1^{er} et le 3^e cycle pour Hr=95 % puis la valeur du module se stabilise). De même le coefficient de Poisson ne varie pas en fonction des cycles pour la plupart des échantillons et des hygrométries sauf pour les échantillons à Hr=95 %, 98 % et 100 %. L'échantillon à Hr=98 % voit son coefficient de Poisson augmenter avec les cycles, celui de l'échantillon à Hr=100 % diminue avec les cycles. Toujours est-il que l'évolution du coefficient de Poisson pour l'échantillon à Hr=95 % est aussi chaotique. Le coefficient de Poisson ne semble pas être influencé cependant par l'hygrométrie.

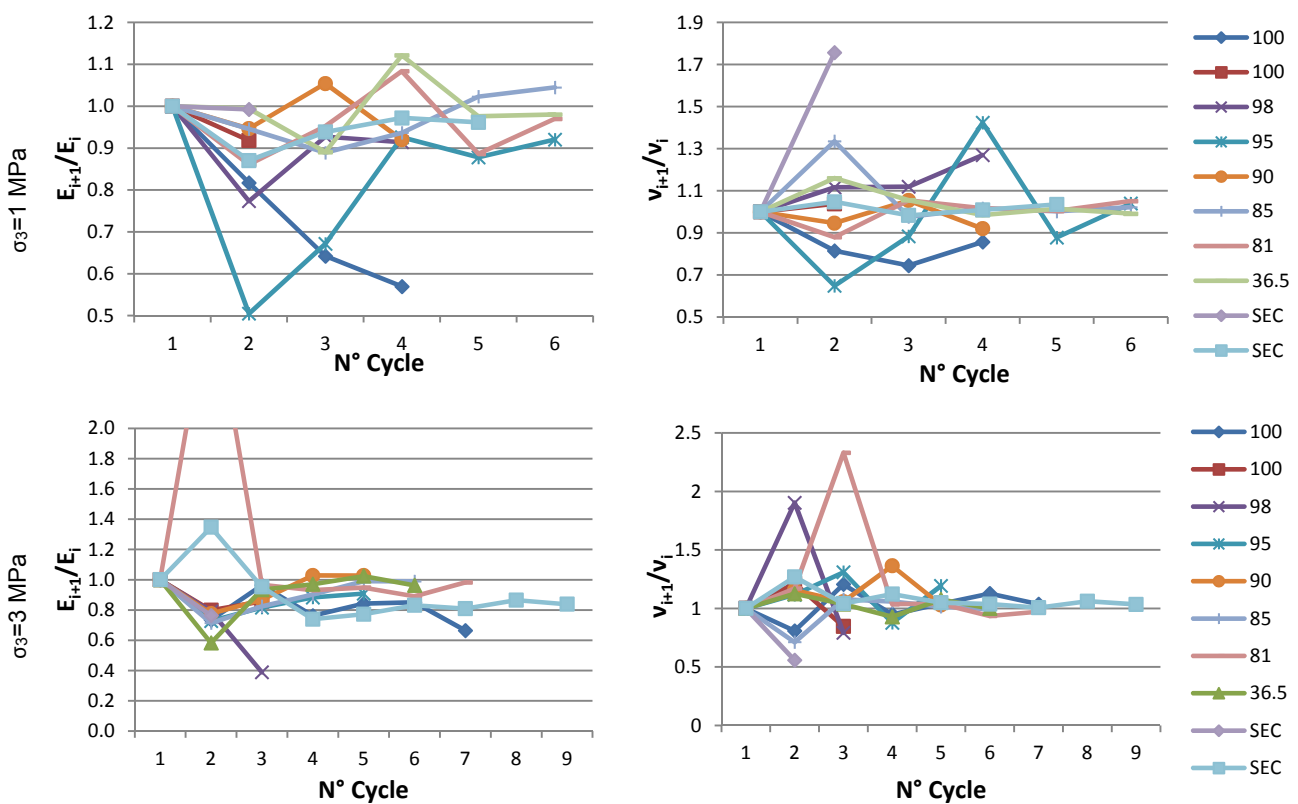


Figure III.23 : Rapports E_{i+1}/E_i et ν_{i+1}/ν_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=1$ et 3 MPa) pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud

Avec un confinement de 3 MPa, l'évolution des différents seuils suit la même tendance que pour le confinement à 1 MPa mais la direction est plus faible (l'écart se creuse moins) et le seuil de contrainte résiduelle est quasi égal au seuil de rupture. La dilatace n'est observée que pour les échantillons totalement secs ou totalement saturés.

Pour ce qui est des paramètres mécaniques en fonction des cycles (voir Figure III.23), le module de Young diminue jusqu'à se stabiliser, le coefficient de Poisson a tendance à augmenter et le module de l'enveloppe à rester stable. L'hygrométrie ne

semble toujours pas influencer les paramètres mécaniques de manière drastique. La forme de la rupture correspond à un plan de cisaillement peu importe le confinement et l'hygrométrie (Figure III.24).



Figure III.24 : Photographies d'échantillons après essai de compression triaxiale, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie de Saint-Martin-le-Noeud

- Craie glauconieuse d'Estreux

Avec un confinement de 1 MPa, pour la craie glauconieuse, les différents seuils (limite élastique, post-pic, dilatance) suivent globalement la même tendance que la résistance au pic. Ces différents seuils possèdent d'ailleurs des valeurs assez proches. Le seuil de contrainte résiduelle est très proche du seuil de rupture pour une hygrométrie supérieure ou égale à 85 %.

Pour ce qui est du déroulement des essais en eux-mêmes, le module de Young cette fois-ci diminue légèrement en fonction des cycles jusqu'à se stabiliser (voir Figure III.25 et Figure III.26). On observe la même tendance en fonction de l'hygrométrie que pour les essais sans confinement. De même, le coefficient de Poisson a tendance à augmenter en fonction des cycles (de manière plus ou moins linéaire) mais l'hygrométrie ne semble pas influencer de manière claire sa valeur. A titre d'anecdote, le module de l'enveloppe a tendance à légèrement augmenter en fonction des cycles mais l'hygrométrie à ce confinement ne semble pas avoir d'influence sur sa valeur.

Avec un confinement de 3 MPa, l'évolution des différents seuils suit la même tendance qu'avec un confinement de 1 MPa, mais les seuils de dilatance et de contrainte résiduelle ne sont pas toujours présents. Néanmoins, les courbes contrainte-déplacement (Annexe B) présentent un écrouissage parfait à partir de 85 % d'hygrométrie.

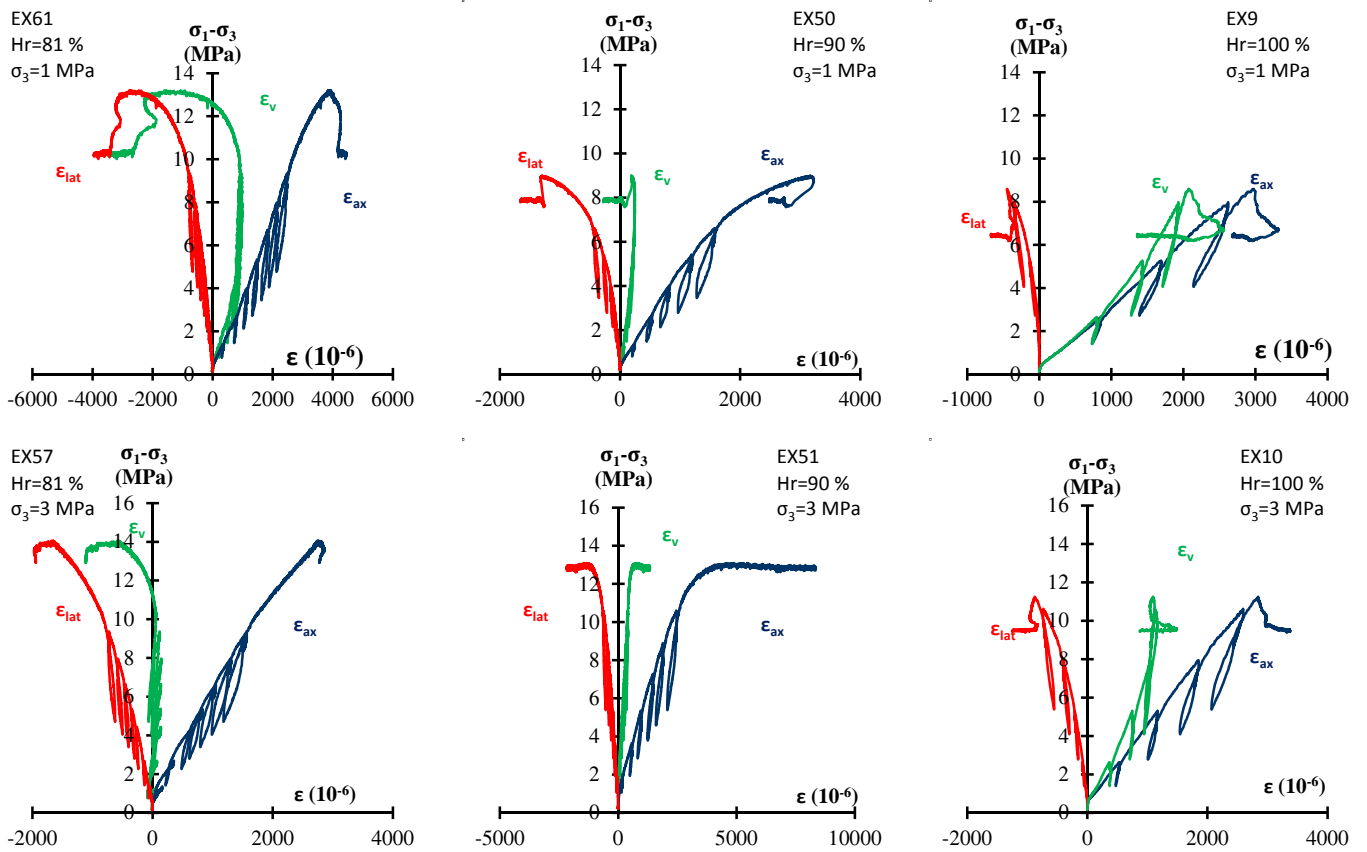


Figure III.25 : Exemples de courbes contrainte-déformation de six essais de compression triaxiale en fonction de l'hygrométrie. 1 MPa et 3 MPa de confinement. Craie d'Estreux

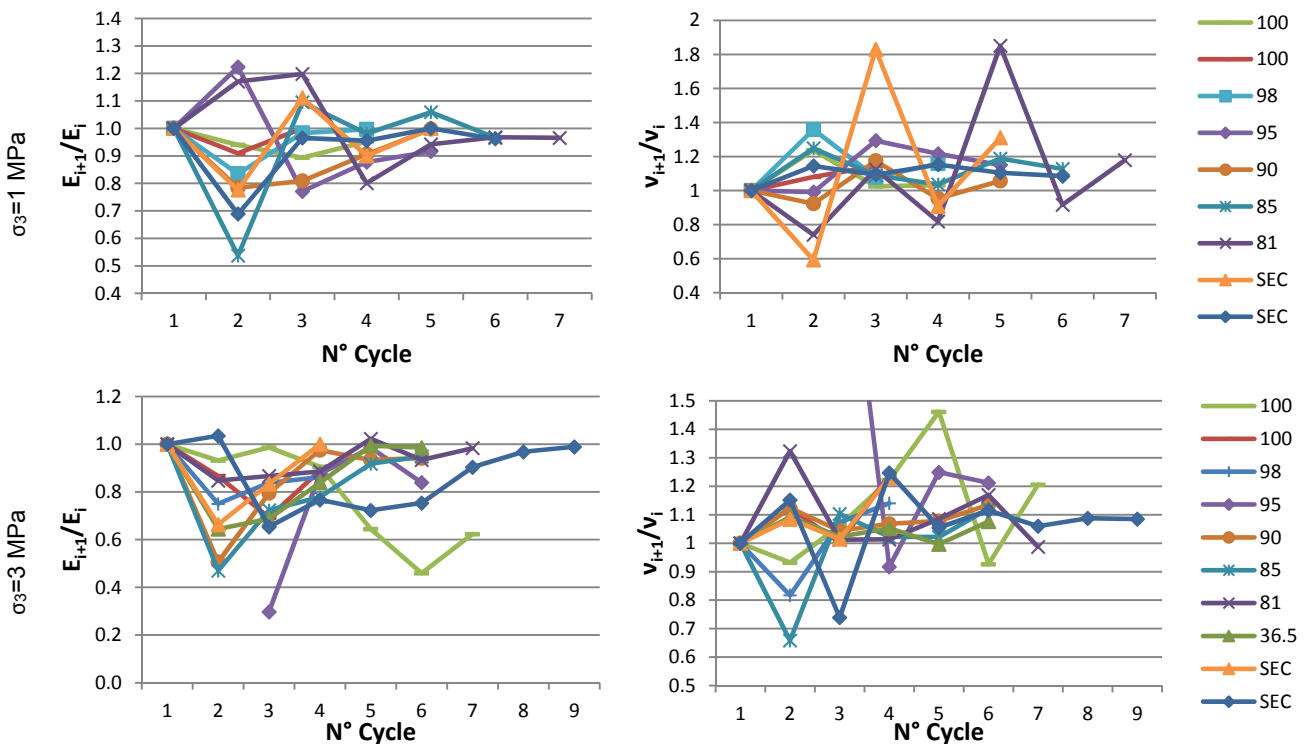


Figure III.26 : Rapports E_{i+1}/E_i et v_{i+1}/v_i en fonction du numéro i de cycle (tous les 2.5 kN) et de l'hygrométrie ($\sigma_3=1$ et 3 MPa) pour la craie d'Estreux

Les modules de Young diminuent très fortement en fonction des cycles jusqu'à se stabiliser (dans la plupart des cas). On observe une diminution de ceux-ci en fonction de l'hygrométrie. Le coefficient de Poisson quant à lui augmente en fonction des cycles mais ne semble pas être influencé par l'hygrométrie.

De manière générale, l'évolution des propriétés mécaniques – en termes de valeurs des seuils – de la craie de Saint-Martin-le-Nœud en fonction de l'hygrométrie est assez chaotique alors que pour la craie d'Estreux, la tendance est plus claire. Le comportement post-pic radoucissant sans confinement tend vers une plasticité sans écrouissage dès lors que le confinement augmente.



Figure III.27 : Photographies d'échantillons après essai de compression triaxiale, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie d'Estreux

- Craie de Château-Landon

La craie de Château-Landon est un peu différente de ses comparses dans le sens où la saturation d'un échantillon fait brutalement chuter sa résistance à la compression triaxiale, comme pour la compression uniaxiale (voir Tableau III.6). Le module de Young à l'état sec est proche de celui de la craie d'Estreux. Le côté pulvérulent de cette craie en rend l'instrumentation assez difficile et les jauges se détachent facilement à l'état saturé ce qui empêche une lecture claire des courbes résultats. La craie de Château-Landon ne présente pas de dilatance à l'état sec excepté pour deux échantillons (CH13 et CH14). Les seuils de limite élastique, de rupture et de contrainte résiduelle ont tendance à augmenter avec le confinement. Pour un confinement de 3 MPa, la contrainte résiduelle est extrêmement proche du seuil de rupture. Pour les échantillons saturés peu importe le confinement (sauf CH5) il n'y a pas de contrainte résiduelle, la craie présente une plasticité sans écrouissage.

Pour ce qui est des formes de rupture (Figure III.29), à l'état sec, la craie rompt principalement en cisaillement même si elle a tendance à s'écraser pour un confinement plus important (3 MPa).

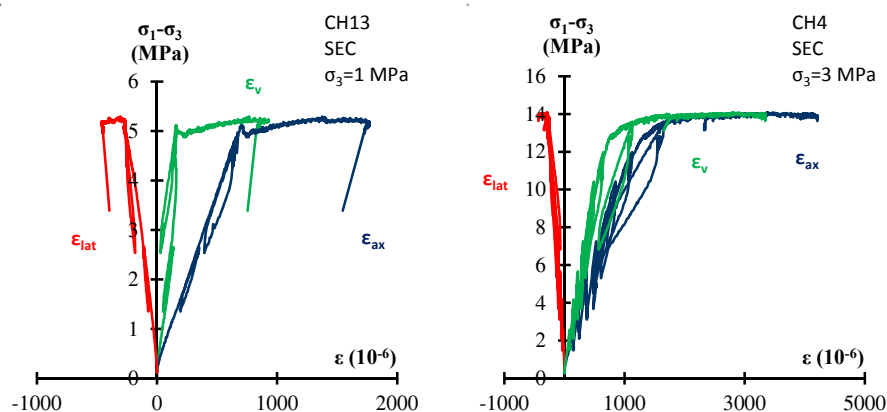


Figure III.28 : Exemples de courbes contrainte-déformation de deux essais de compression triaxiale en fonction de l'hygrométrie. 1 MPa et 3 MPa de confinement. Craie de Château-Landon

La craie s'écrase cependant à l'état saturé quel que soit le confinement. Du fait de cet état, l'extraction de la cellule après rupture des échantillons altère la tenue de ceux-ci et des fractures transversales apparaissent à chaque fois, rendant ainsi le repérage des plans de rupture, s'ils existent, particulièrement difficile. C'est pour cette raison que les échantillons saturés semblent présenter des « plans de rupture transversaux » (Figure III.29) alors que ces « plans » ne sont que le résultat de leur extraction de la cellule triaxiale et de l'enveloppe de silasthène.

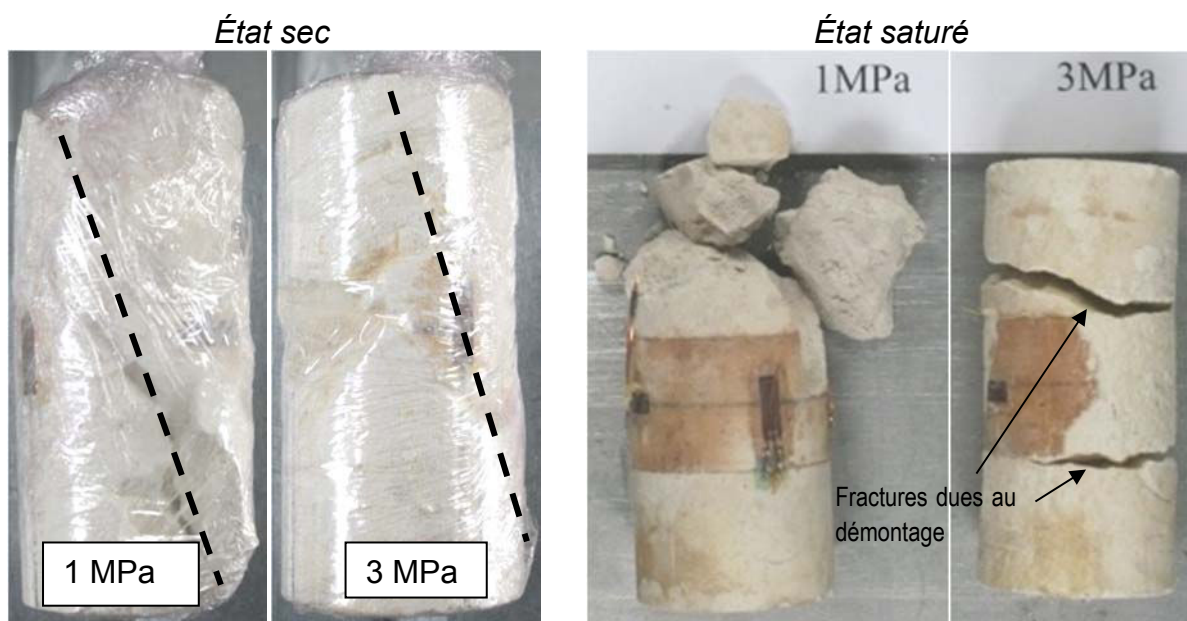


Figure III.29 : Photographies d'échantillons après essai de compression triaxiale, en fonction de l'état hydrique, et formes de rupture. Craie de Château-Landon

III.4.2.1.3. Tractions

Le Tableau III.9 présente les valeurs de résistance en traction des craies d'Estreux, de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon.

Tableau III.9 : Valeurs des résistances en traction (en MPa) pour les craies d'Estreux, de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon

	Estreux	Saint-Martin-le-Nœud	Château-Landon
Résistance en traction – État sec	0.8	1.20	0.4±0.06
Résistance en traction – Hr=98%	0.5	0.4	-
Résistance en traction – État saturé	0.4	0.6	0.1±0.06

La résistance en traction des craies est faible et présente un ratio de ½ entre les états sec et saturé. L'ordre des craies les plus résistantes à la traction sont la craie de Saint-Martin-le-Nœud, la craie d'Estreux et la craie de Château-Landon.

III.4.2.2. Critères de rupture

La Figure III.30 représente les valeurs du déviateur (correspondant à la résistance au pic) en fonction du confinement pour toutes les hygrométries imposées. Elle montre que pour la craie glauconieuse et ce quelle que soit la valeur d'hygrométrie, il y a une augmentation du déviateur des contraintes avec le confinement.

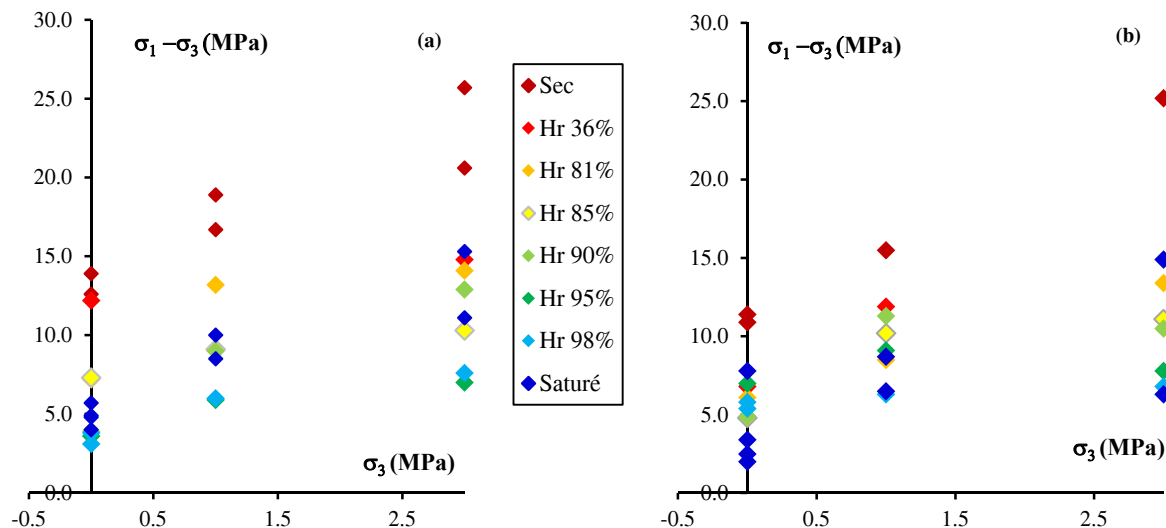


Figure III.30 : Influence de l'hygrométrie et du confinement sur la résistance en compression. Résistance au pic dans le plan déviateur-confinement. Craies (a) d'Estreux et (b) de Saint-Martin-le-Nœud

Pour la craie dolomitique le bilan est un peu plus mitigé : le passage de la craie à un confinement de 1 MPa a pour effet d'augmenter la valeur du déviateur à la rupture et ce peu importe l'hygrométrie, mais au passage à un confinement de 3 MPa la valeur du déviateur à la rupture n'est pas toujours supérieure à celle trouvée pour un confinement de 1 MPa. On remarquera cependant que pour les deux craies, l'augmentation de l'hygrométrie apporte toujours un abaissement du déviateur et ce peu importe le confinement.

Les trois critères de Mohr-Coulomb, de Drucker-Prager et de Hoek et Brown ont été appliqués aux résultats des essais de compression. Le premier est représenté dans les plans $(\sigma_1 ; \sigma_3)$, le second dans le plan $(p ; q)$ et le dernier dans le plan $((\sigma_1 - \sigma_3)^2 ; \sigma_3)$.

En fonction des contraintes principales (σ_1 ; σ_3), et pour des essais de compression uniaxiale ou triaxiale, le critère de Mohr Coulomb s'écrit :

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} + 2c \frac{\cos \varphi}{1-\sin \varphi} \quad (\text{III.16})$$

Le critère de Drucker-Prager s'écrit en fonction de p et q de la manière suivante :

$$q = \frac{6 \sin \varphi}{3-\sin \varphi} p + 6c \frac{\cos \varphi}{3-\sin \varphi} \quad (\text{III.17})$$

Le critère empirique de Hoek et Brown, applicable pour les roches et les massifs rocheux isotropes, s'écrit :

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + s \sigma_{ci}^2 \quad (\text{III.18})$$

○ Craie d'Estreux

Les Figure III.31 et Figure III.32 présentent les critères de Mohr-Coulomb respectivement pour les résistances au pic σ_c et le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie d'Estreux dans les deux plans (σ_1 ; σ_3) et (p ; q). Des courbes de tendance ont été ajoutées pour les cas sec, à Hr=90 %, à Hr=98 % et en saturé (Hr=100 %), ainsi que pour les autres seuils lorsque les résultats le permettent (les seuils ne sont pas tous atteints à chaque fois). Les critères de rupture présentés en Figure III.31 donnent un exemple visuel de variation de c et φ en fonction de l'hygrométrie. Une augmentation de l'hygrométrie (de 36.5 à 98 %) fait diminuer la cohésion mais ne fait diminuer l'angle de frottement qu'à partir de Hr=95 %. La craie d'Estreux se représente bien par une droite dans les plans (σ_1 ; σ_3) et (p ; q). La Figure III.33 présente le critère de rupture de Hoek et Brown pour les résistances au pic de la craie d'Estreux.

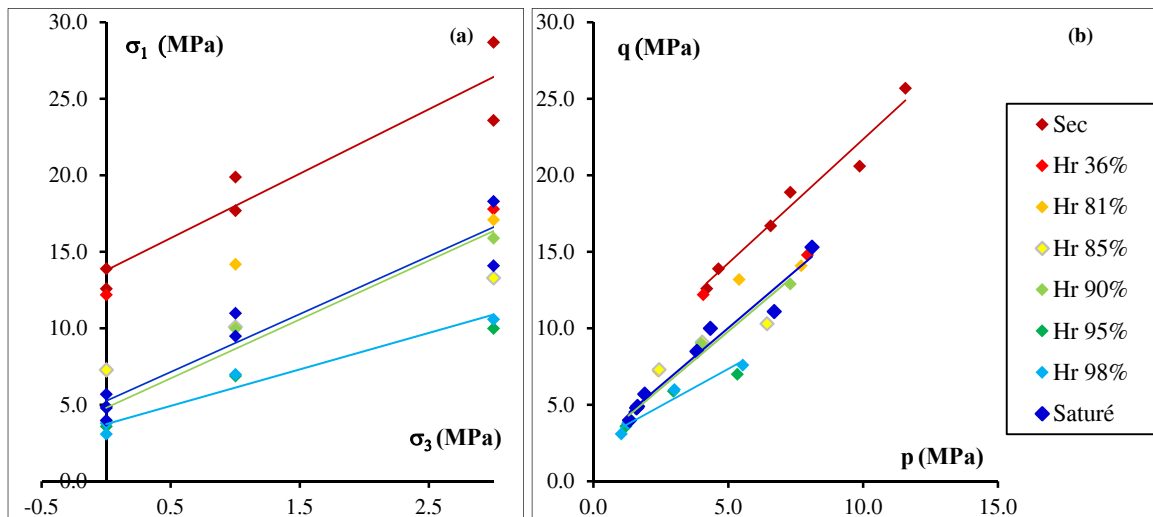


Figure III.31 : Critères de rupture pour la résistance au pic σ_c de la craie d'Estreux dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q)

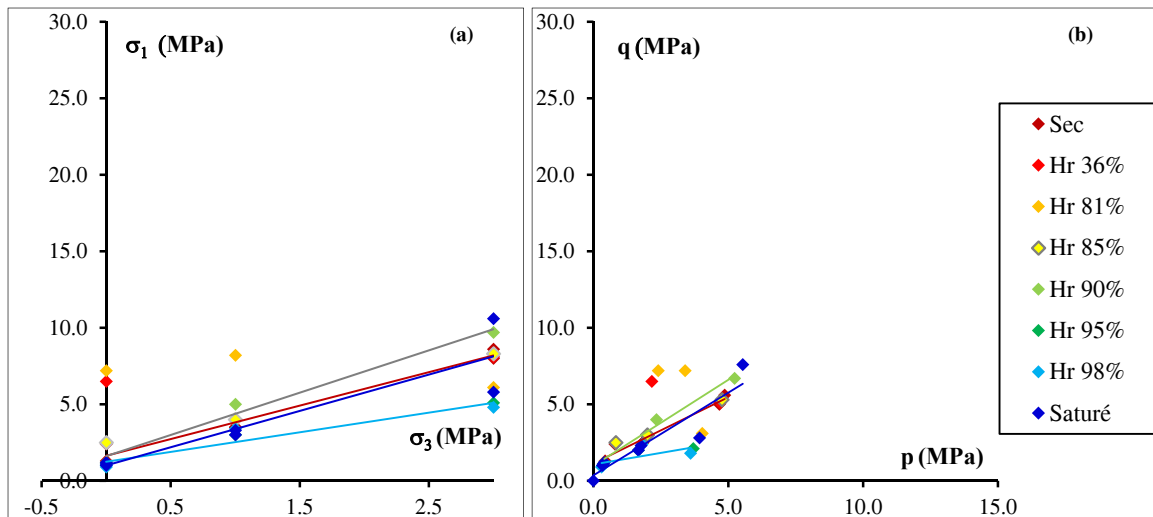


Figure III.32 : Critères pour le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie d'Estreux dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q)

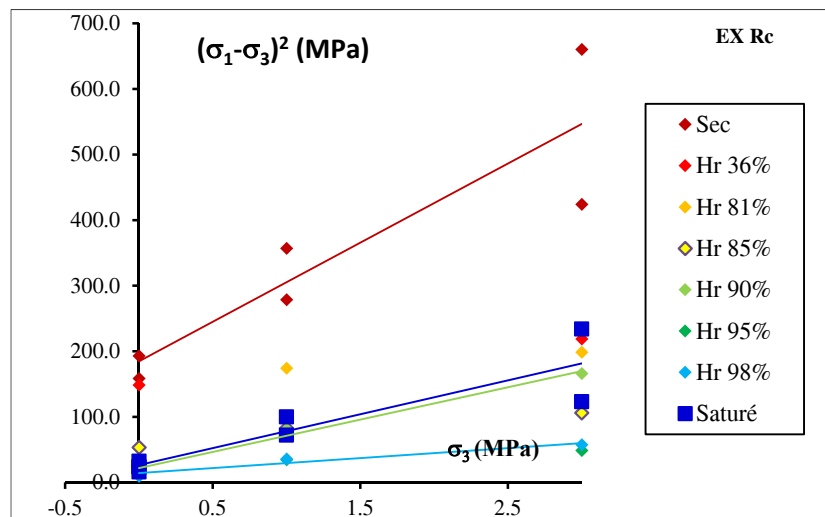


Figure III.33 : Critère de Hoek&Brown pour la résistance au pic de la craie d'Estreux

Il apparaît de tous ces critères lorsque mis ensemble, que les surfaces de charges (entrée en plasticité, rupture et post-pic) se rejoignent à partir d'un certain seuil selon une hygrométrie donnée (dans le diagramme (p ; q)). Les surfaces de charge correspondant au comportement post-pic sont plus ou moins parallèles (sauf pour les hygrométries à 95 % et 98 %), et rejoignent la surface de charge correspondant à la rupture pour des contraintes moyenne et déviatorique plus faibles dès lors que l'hygrométrie augmente (plasticité sans écrouissage). Les surfaces de charge correspondant à l'entrée en plasticité et la rupture se recoupent dans le domaine des compressions pour une hygrométrie allant croissante jusqu'à 90 %. À partir d'une hygrométrie de 95 %, elles se recoupent dans le domaine des tractions et le domaine plastique augmente entre deux hygrométries.

○ Craie de Saint-Martin-le-Nœud

Les Figure III.34 et Figure III.35 présentent les critères respectivement pour les résistances au pic R_c et les seuils de plasticité σ_L de la craie de Saint-Martin-le-Nœud dans les deux plans $(\sigma_1 ; \sigma_3)$ et $(p ; q)$. Des courbes de tendance ont été ajoutées pour les cas sec, à Hr=90 %, à Hr=98 % et en saturé (Hr=100 %), ainsi que pour les autres seuils lorsque les résultats le permettent (certains seuils ne sont jamais atteints pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud). Il semble que cette craie se représente mieux dans le plan $(p ; q)$ que dans le plan $(\sigma_1 ; \sigma_3)$.

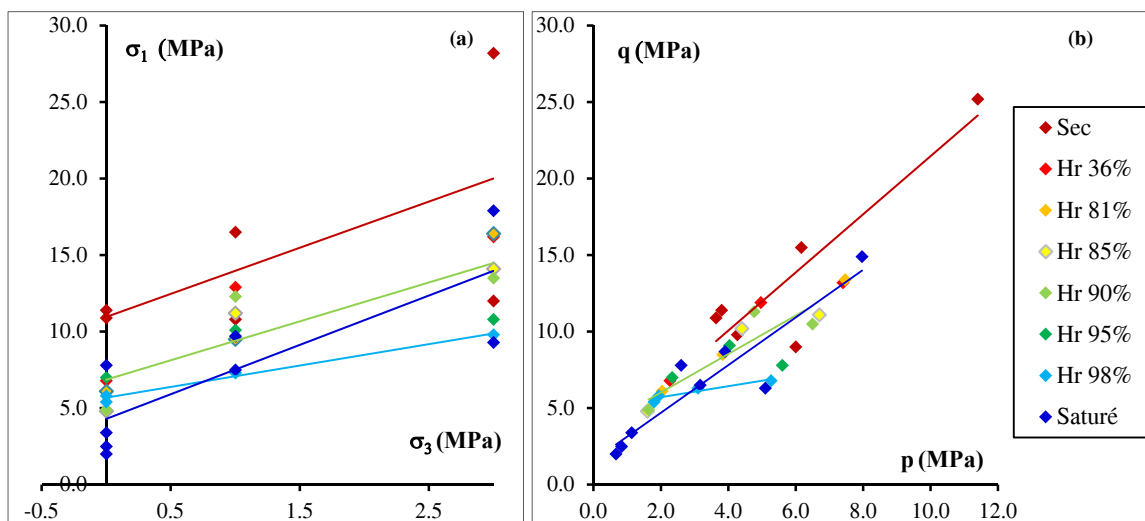


Figure III.34 : Critères de rupture pour la résistance au pic de la craie de Saint-Martin-le-Nœud dans les plans (a) des contraintes principales $(\sigma_1 ; \sigma_3)$ et (b) déviateur-contrainte moyenne $(p ; q)$

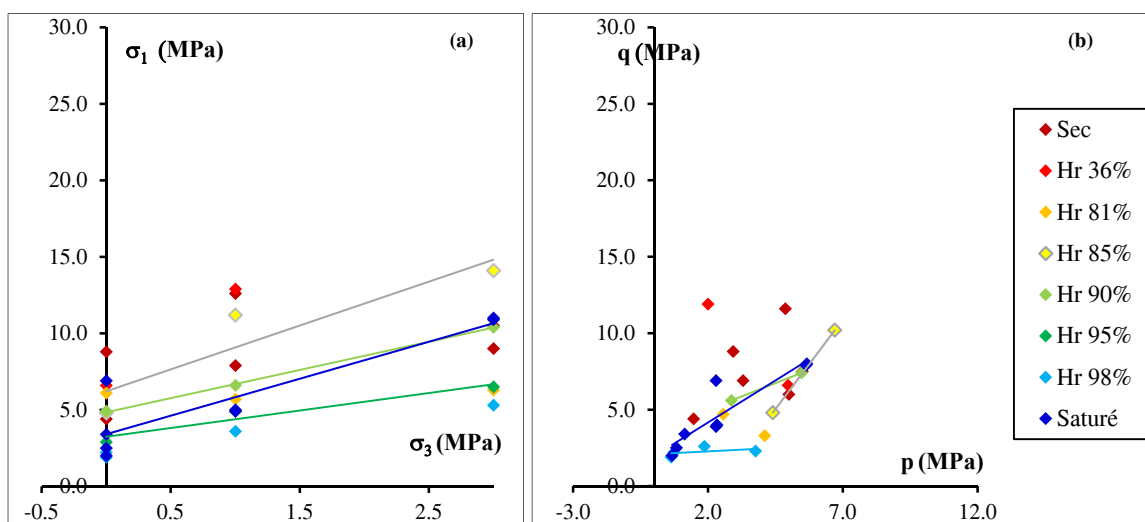


Figure III.35 : Critères pour le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie de Saint-Martin-le-Nœud dans les plans (a) des contraintes principales $(\sigma_1 ; \sigma_3)$ et (b) déviateur-contrainte moyenne $(p ; q)$

Les critères de rupture présentés en Figure III.34 donnent un exemple visuel de variation de c et ϕ en fonction de l'hygrométrie. Une augmentation de l'hygrométrie

(de 36.5 à 98 %) ne semble pas avoir d'impact sur la cohésion mais semble faire diminuer légèrement l'angle de frottement. Les états complètement sec et saturé ne présentent pas de différence entre les valeurs des angles de frottement mais la cohésion diminue. La Figure III.36 présente le critère de rupture de Hoek et Brown pour les résistances au pic de la craie de Saint-Martin-le-Nœud.

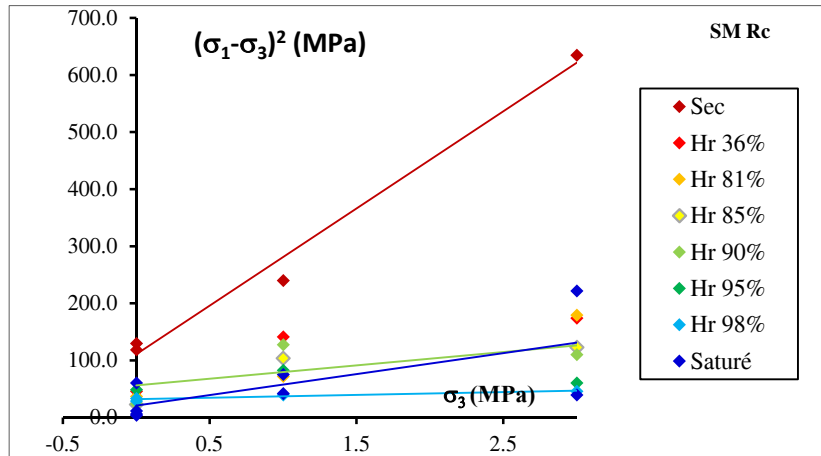


Figure III.36 : Critère de Hoek&Brown pour la résistance au pic de la craie de Saint-Martin-le-Nœud

Il apparaît de tous ces critères lorsque mis ensemble, que les surfaces de charges (entrée en plasticité, rupture et post-pic) restent plus ou moins parallèles selon une hygrométrie donnée. Les surfaces de charge correspondant au comportement post-pic ne sont pas parallèles et présentent une diminution globale du coefficient directeur en fonction de l'hygrométrie. L'angle de frottement ne change pas au cours de l'essai quelle que soit l'hygrométrie. Néanmoins la cohésion a tendance à augmenter au cours de l'essai et ce quelle que soit l'hygrométrie considérée, même si le domaine plastique a tendance à s'agrandir.

○ Craie pure de Château-Landon

Les Figure III.37 et Figure III.38 présentent les critères respectivement pour les résistances au pic R_c , et le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie de Château-Landon dans les deux plans $(\sigma_1 ; \sigma_3)$ et $(p ; q)$. La Figure III.39 présente le critère de Hoek et Brown de la craie de Château-Landon dans les états sec et saturé.

La craie de Château-Landon présente des valeurs très dispersées à l'état sec, et ce d'autant plus que le confinement est important excepté peut-être pour le seuil d'initiation de la microfissuration dont l'évolution se représente plutôt bien par une droite.

À l'état saturé, les critères de rupture se représentent assez bien par une droite puisqu'il y a moins de dispersion dans les valeurs.

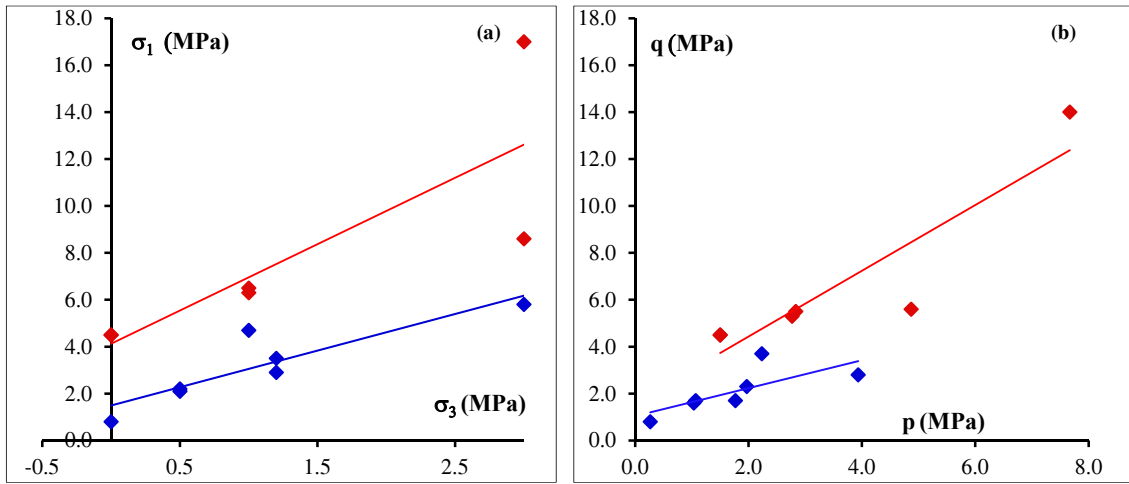


Figure III.37 : Critères de rupture pour la résistance au pic de la craie de Château-Landon dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q). Etat sec (rouge) et état saturé (bleu)

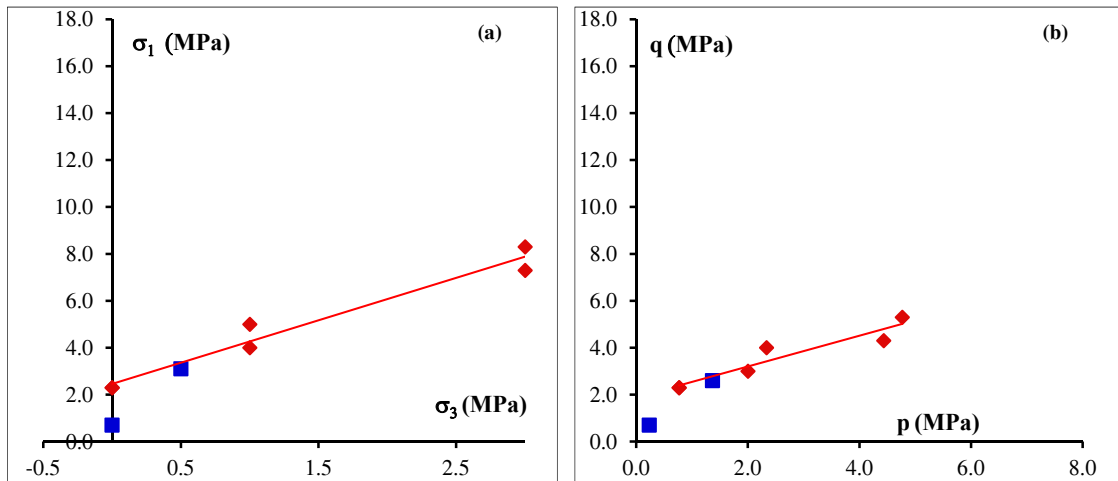


Figure III.38 : Critères pour le seuil d'entrée en plasticité σ_L de la craie de Château-Landon dans les plans (a) des contraintes principales (σ_1 ; σ_3) et (b) déviateur-contrainte moyenne (p ; q). Etat sec (rouge) et état saturé (bleu)

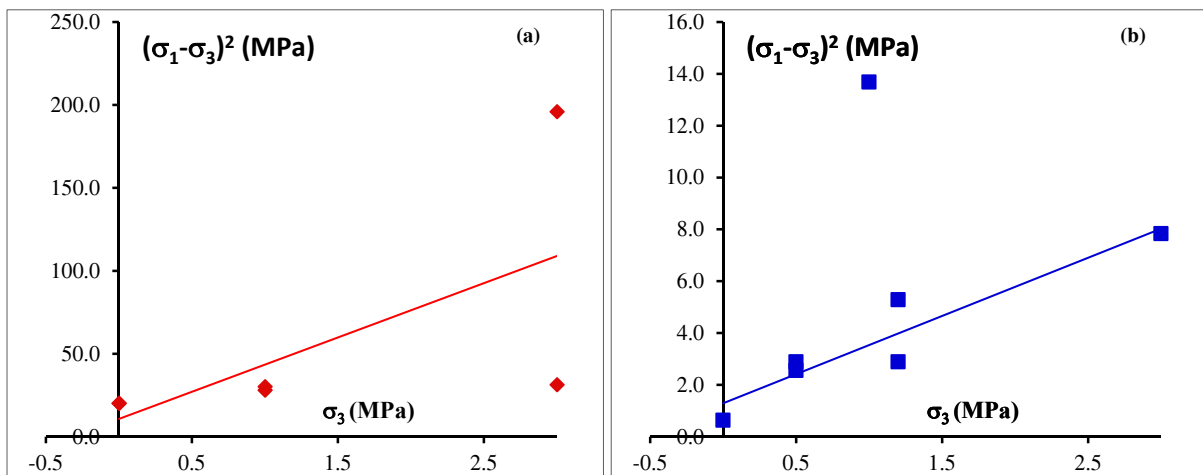


Figure III.39 : Critère de Hoek&Brown pour la résistance au pic de la craie de Château-Landon (a) état sec (b) état saturé

○ Paramètres des critères et évolution en fonction de l'état hydrique

Les Figure III.40 et Figure III.41 présentent les valeurs des paramètres (obtenues via la méthode des moindres carrés) des critères de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager et Hoek et Brown pour la résistance au pic en fonction de l'hygrométrie et de la craie (Estreux ou Saint-Martin-le-Nœud) déterminés à partir des essais mécaniques.

Le Tableau III.10 présente les valeurs des paramètres des critères de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager et Hoek et Brown pour la résistance au pic pour la craie de Château-Landon dans les conditions sèches ou saturées.

Chaque craie voit globalement sa cohésion c diminuer en fonction de l'hygrométrie qui lui a été imposée (donc le degré de saturation correspondant. Voir Chapitre III § III.3.2.3). On peut remarquer que d'une représentation à l'autre, les valeurs de c et φ diffèrent peu pour la craie d'Estreux et ce quelle que soit l'hygrométrie. Ce qui n'est malheureusement pas le cas pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud et en particulier pour la cohésion. La craie de Château-Landon voit quant à elle sa cohésion et son angle de frottement diminuer de façon drastique entre les états sec et saturé.

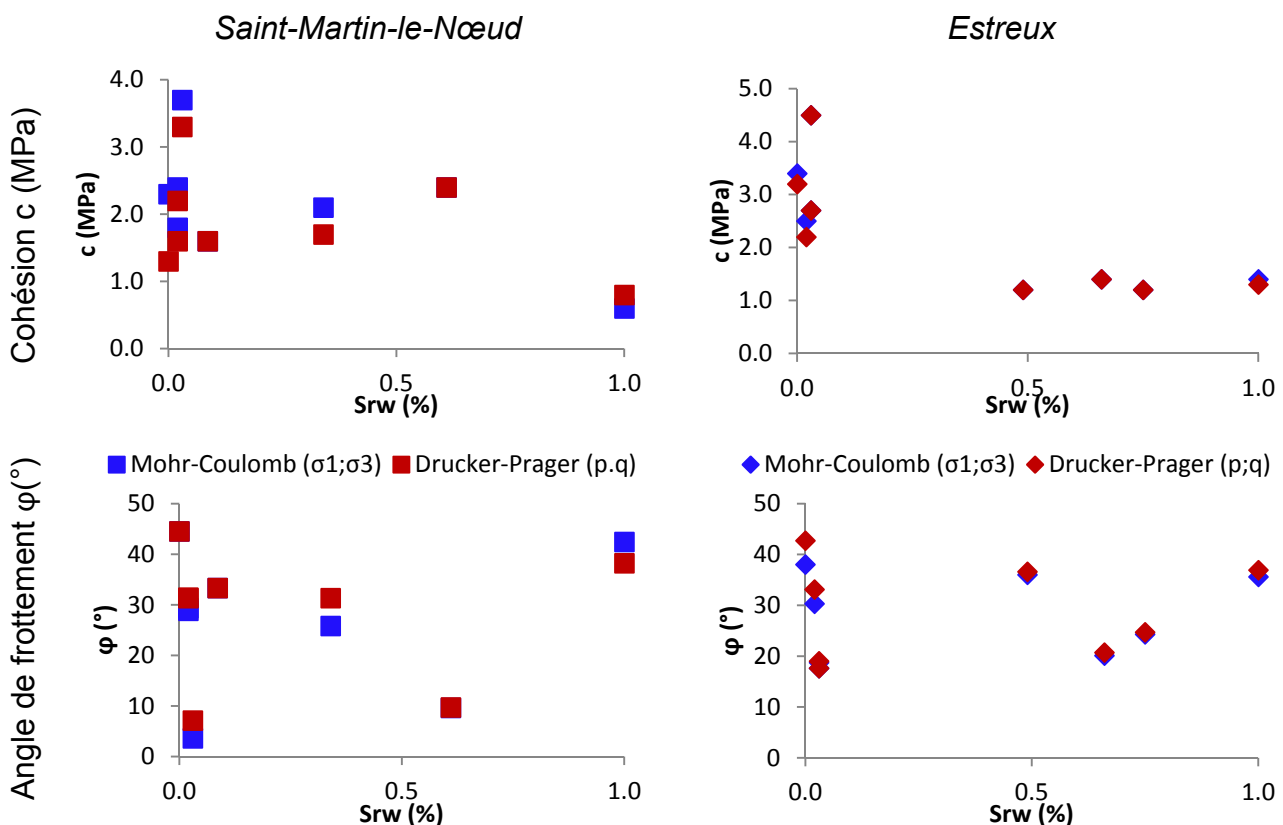


Figure III.40 : Paramètres des critères de rupture de Mohr-Coulomb et de Drucker-Prager pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud en fonction du degré de saturation

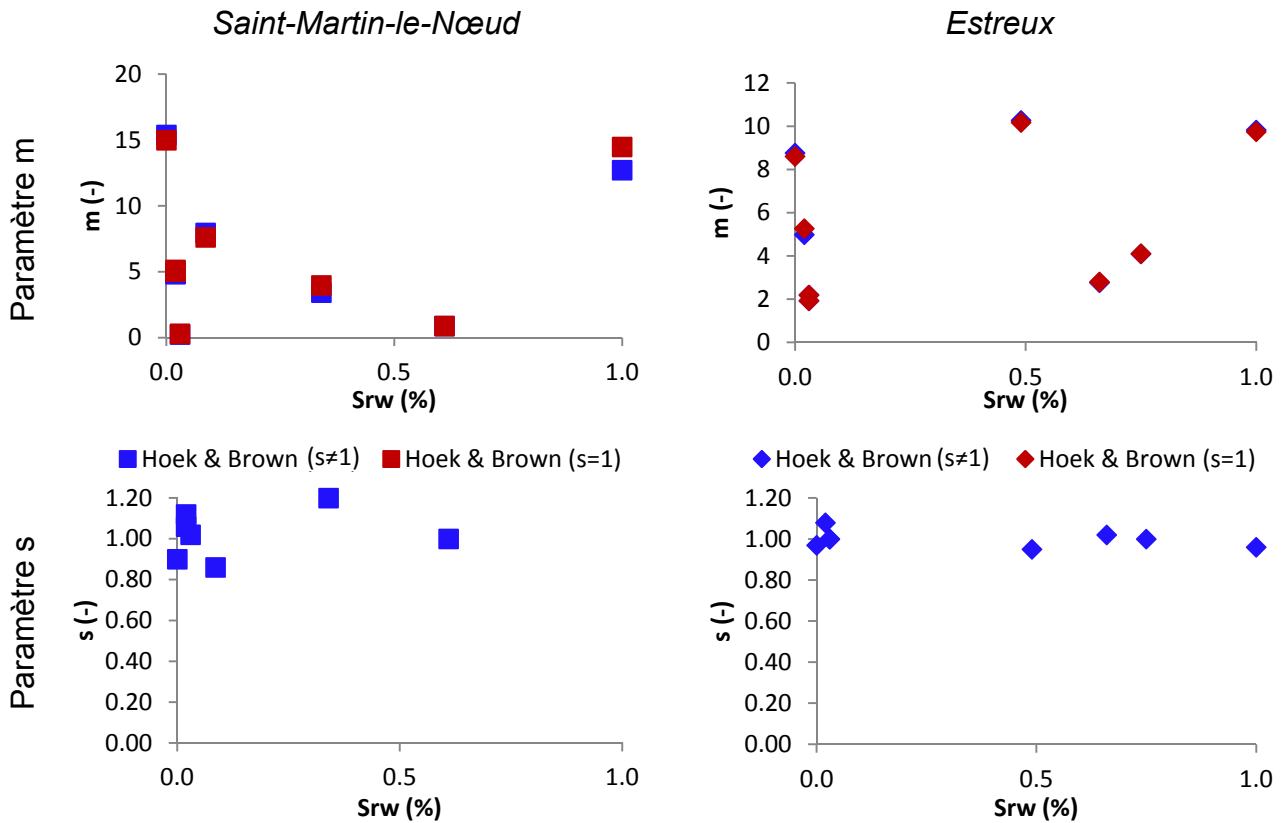


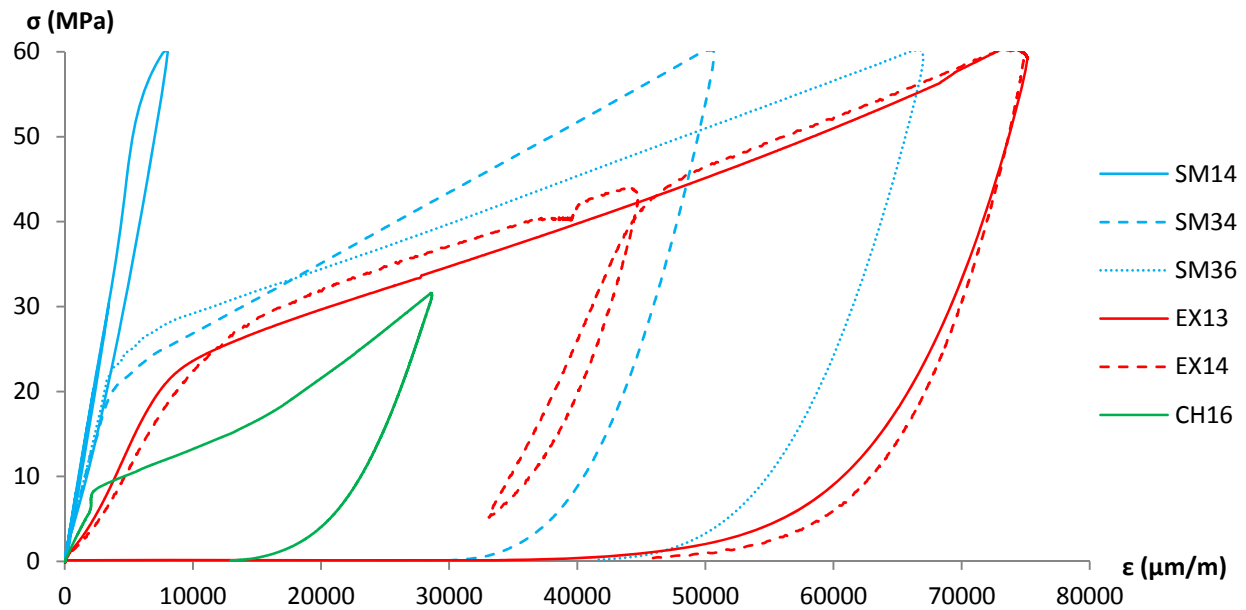
Figure III.41 : Paramètres des critères de rupture de Hoek & Brown pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Noëud en fonction du degré de saturation

Tableau III.10 : Critères de rupture pour la craie de Château-Landon dans les états sec et saturé

Hr	Mohr-Coulomb ($\sigma_1; \sigma_3$)		Drucker-Prager (p;q)		Hoek & Brown (meilleur ajustement)				Hoek & Brown (ajustement forcé s=1)			
	ϕ (°)	c (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	pen	inter	m	s	pen	inter	m	s
Sec	28.50	1.20	34.60	0.80	32.73	10.73	7.93	0.63	30.20	17.05	7.31	1.00
Sat	12.60	0.60	15.70	0.50	2.25	1.29	1.50	0.58	1.76	2.23	1.18	1.00

III.4.2.3. Essais de compression isotrope

Les courbes volumiques des essais de compression isotropes sont placées sur la Figure III.42. Trois phases se distinguent : une première phase correspondant à un comportement élastique quasi-linéaire, une seconde caractérisée par une forte contractance (changement de concavité) plastique, et une troisième dénotant une densification de la craie par un écrouissage croissant. La deuxième phase est une conséquence de l'effondrement progressif de la structure poreuse par rupture des ponts et des liaisons électro-statiques entre les grains solides de la craie et la croissance de la surface des contacts, entraînant une augmentation de la compressibilité du matériau (d'après Schroeder 2002, Monjoie et al. 1990). La troisième phase est due à la diminution de la porosité de la craie.



	K (GPa)	P_{col} (MPa)	P_t (MPa)	K' (GPa)	n_f (10^{-4})
Estreux	2.9	21	-	-	?
Saint-Martin-le-Nœud	6.4 à 9.7	20 ou >50	-	-	0
Château-Landon	3.1	6	16	1.1	0

Figure III.42 : Courbes contrainte-déformation de plusieurs essais de compression isotrope et paramètres associés (K : coefficient de compressibilité ; P_{col} : seuil de « pore collapse » ; P_t : seuil de raidissement ; K' : nouveau coefficient de compressibilité ; n_f : porosité de fissure).

Les courbes d'essai sur la craie d'Estreux peuvent se superposer quel que soit l'échantillon considéré. Durant les essais il n'a pu être mis en évidence que les phases élastique et contractante. La phase élastique n'est pas linéaire en tout début d'essai, ce qui suggérerait une éventuelle porosité de fissure. Néanmoins, comme la craie d'Estreux possède une texture de type wackestone (cf § III.3.2.1) avec des objets allongés (bivalves) cette non linéarité en début d'essai peut être due à la réduction des espaces entre ces objets allongés et la matrice plutôt qu'à de la fissuration (étayée par les vitesses des ondes en § III.3.2.1). Les courbes contrainte-déformation dans les trois directions (voir Annexe B) sont parfaitement parallèles quelle que soit la phase considérée. Ceci suggère que la craie d'Estreux est également isotrope mécaniquement parlant. Son coefficient de compressibilité K est similaire à celui de la craie de Château-Landon mais son seuil de pore-collapse est similaire à celui de la craie de Saint-Martin-le-Nœud. Aucun seuil de raidissement n'a été observé.

Les courbes d'essai sur tous les échantillons de la craie de Saint-Martin-le-Nœud ne se superposent que pour la phase élastique. La pente de la courbe lors de la phase contractante diffère d'un échantillon à l'autre. Les échantillons SM34 et SM36 atteignent le même seuil de pore-collapse. L'échantillon SM14 n'a qu'initié la phase contractante (seuil de pore-collapse estimé à 52 MPa). Les courbes contrainte-déformation dans les trois directions (voir Annexe B) sont parfaitement parallèles –

quel que soit l'échantillon – en phase élastique. Néanmoins, ces courbes divergent plus ou moins les unes des autres – mais toujours de manière significative – lors de la phase contractante suivant l'échantillon considéré. Ce qui suggérerait que la craie de Saint-Martin-le-Nœud est isotrope mécaniquement en phase élastique, mais qu'elle perd cette isotropie mécanique lorsqu'elle rentre en plasticité.

La craie de Château-Landon présente un seuil de pore-collapse plus bas que ses consoeurs mais un coefficient de compressibilité équivalent à celui de la craie d'Estreux. Il s'agit de la seule craie ayant atteint un seuil de raidissement avant d'atteindre la capacité de la cellule. Les courbes d'essai (Annexes B) présentent le même profil que ceux de la craie de Saint-Martin-le-Nœud : on ne retrouve plus l'isotropie mécanique (présente en phase élastique) une fois arrivés en phase plastique.

En prenant en compte les porosités des trois craies et selon la bibliographie (voir Chapitre I), on devrait s'attendre à ce que comparativement plus la craie est poreuse et plus rapidement le seuil de pore-collapse est atteint. Cette constatation suppose que les jonctions entre grains sont de même nature. Les craies d'Estreux et de Château-Landon qui ont respectivement une porosité de 35 % et 44 % vérifient ce postulat. Néanmoins, la craie de Saint-Martin-le-Nœud, qui possède une porosité de 42 %, se démarque des deux autres puisqu'elle possède un seuil de pore-collapse équivalent à celui de la craie d'Estreux mais un coefficient d'incompressibilité nettement supérieur. De plus, son domaine plastique est beaucoup plus restreint que celui de la craie d'Estreux. Par conséquent, cette discrimination implique que les jonctions entre les grains pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud, sont soit plus nombreuses et énergétiquement plus stables (si de même nature que celle des autres craies), soit d'une nature différente de celles des autres craies.

III.4.3. Discussion

La craie comporte généralement deux comportements déviatoriques distincts en fonction du confinement appliqué. Ce type de comportement se traduit par un comportement fragile à élastoplastique – avec écrouissage radoucissant, avec présence parfois de pics de résistance – si le confinement est trop faible voire nul.

Le comportement passe d'élastoplastique (radoucissant) à un comportement plus ductile – avec écrouissage durcissant – et la phase élastique se réduit dès lors que le confinement est plus important. Selon la littérature, au-delà d'un certain confinement, la phase élastique disparaît complètement. La craie subissant un chargement déviatorique aurait donc plutôt un comportement élastoplastique avec écrouissage (Schroeder 2003, Schroeder 2002, Homand et Shao 2000b, Homand et Shao 2000c, Homand et Shao 2000a, Xie 2005, Bahat et al. 2001, Siwak et al. 1994). Du fait de sa grande porosité, la déformation volumique plastique est la plupart du temps contractante. Cependant, la craie peut présenter une faible phase de dilatance lorsque la pression de confinement est faible.

De plus, la présence d'eau modifie le comportement mécanique de la craie notamment sa résistance en fonction du degré de saturation (Nguyen 2009, Priol 2005, De Gennaro et al. 2003, Schroeder 2002). La Figure III.43 montre certaines valeurs de résistance trouvées dans la bibliographie. Dans le cas des sols partiellement saturés, le domaine élastique doit normalement s'amoinrir dès lors que l'hygrométrie augmente (Alonso et al. 1990). En traction, les trois craies étudiées se présentent plutôt bien dans la fourchette de valeurs typiques des autres craies (Schroeder 2002).

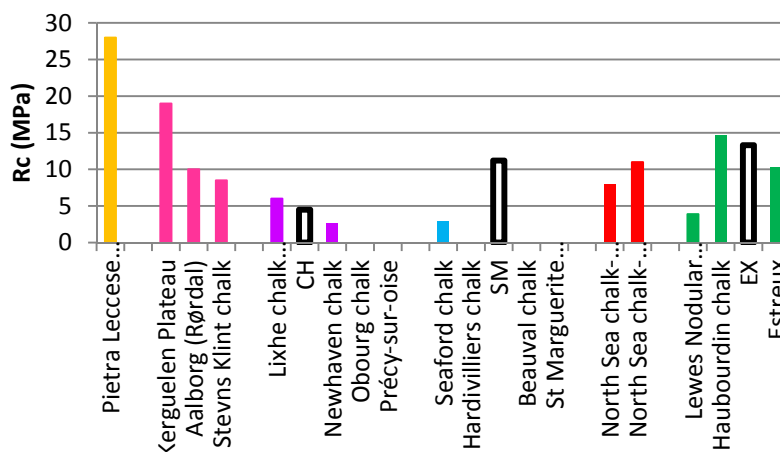


Figure III.43 : Confrontation des trois craies avec les données de la littérature. Cas de la résistance en compression – Âges géologiques des craies de faibles profondeurs : Miocène (orange), Maastrichtien (rose), Campanien (violet), Santonien (bleu), Turonien (vert) – Craies de grande profondeur (rouge)

Les résultats pour les craies glauconieuse, dolomitique et pure sont assez représentatifs de ce type de comportement et notamment en présence d'eau : les propriétés mécaniques s'affaiblissent et les deux comportements déviatoriques sont parfaitement représentés, même s'ils ne le sont pas sous les mêmes conditions : la transition n'est pas située aux mêmes niveaux de contrainte pour les trois craies (cf. Chapitre III § III.4.2). Le domaine élastique diminue également en fonction de la saturation (Figure III.32, Figure III.35 et Figure III.38).

Il y a cependant certaines différences par rapport aux connaissances issues de la bibliographie.

Bell et al. 1999 avaient montré que moins la craie est poreuse plus elle est résistante en présence d'eau pour un même degré de saturation. Ce postulat se vérifie pour les craies d'Estreux (n=35 %) et de Château-Landon (n=44 %), cependant la craie de Saint-Martin-le-Nœud, bien que présentant une porosité du même ordre que la craie de Château-Landon (environ 40 %), est nettement plus résistante dans un état saturé que sa comparse glauconieuse. Ceci implique, entre autres, que le moteur de cette diminution en fonction de la saturation n'est pas uniquement capillaire en tout cas pour Saint-Martin-le-Nœud. Taibi et al. 2009 avaient montré également que les propriétés mécaniques (ici le module sécant, et non le module de Young) diminuaient

en fonction de la saturation. Ceci est valable pour les craies d'Estreux et de Château-Landon qui voient leurs propriétés mécaniques affectées par la présence d'eau, mais pas pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud pour laquelle les modules de Young et coefficients de Poisson (tout comme ceux qualifiés de dynamiques) ne semblent pas impactés par une augmentation de la saturation, au contraire de sa résistance en compression uniaxiale.

Ces différences entre chaque craie sont impérativement à relier à leurs propriétés intrinsèques, à savoir leur porosité et leur minéralogie (Bell et al. 1999, Monjoie et al. 1990), notamment en raison des propriétés de physisorption des minéraux accessoires dont la proportion dépasse les 10 %, de manière à pouvoir discriminer le facteur prépondérant.

En conséquence, la porosité n'est pas le premier facteur régissant le comportement de la craie, en terme de prépondérance, mais le deuxième. Le premier semble être la nature donc la stabilité énergétique des liaisons entre les grains.

À titre de comparaison, la Figure III.44 illustre l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction du degré de saturation, pour les craies de Saint-Martin-le-Nœud et d'Estreux en parallèle de résultats pour d'autres roches sédimentaires.

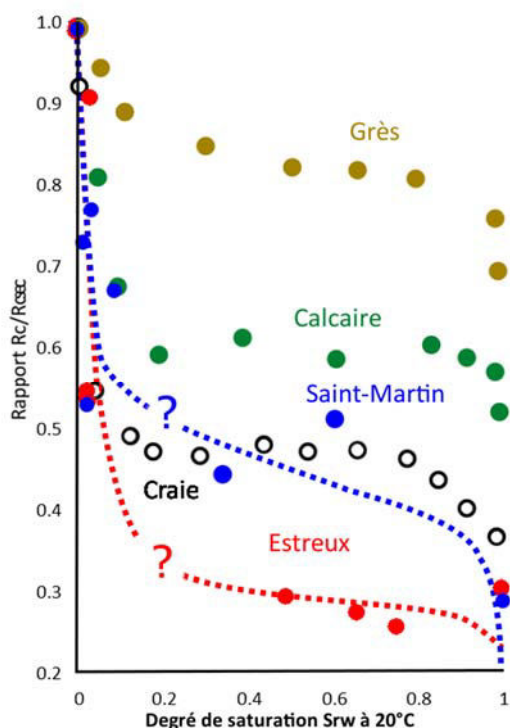


Figure III.44 : Variation du ratio R_c/R_{csec} en fonction du degré de saturation en parallèle de résultats pour d'autres roches sédimentaires (d'après Watelet 1996)

Le Tableau III.11, quant à lui, présente une comparaison de certaines valeurs du module d'élasticité isostatique K obtenues à partir des mesures de vitesses d'ondes

(K_{dyn}), des essais déviatoriques ($K_{dév}$) et des essais hydrostatiques (K_{Pcol}). Il en résulte que les valeurs de K_{dyn} et K_{Pcol} sont similaires pour chaque craie, et que la différence notée par rapport aux valeurs de $K_{dév}$ n'est due qu'aux chemins de contrainte suivi par le matériau.

Tableau III.11 : Comparaison des valeurs des modules d'élasticité isostatique dynamiques, déviatoriques et hydrostatiques

K (GPa)	σ_3 (MPa)	Estreux		Saint-Martin-le-Noeud		Château-Landon	
		SEC	SAT	SEC	SAT	SEC	SAT
<i>K calculé à partir des paramètres dynamiques</i>							
K_{dyn}		3.89±0.53	9.65±1.08	8.76±1.46	13.7±1.34	3.06±0.41	7.06±0.61
<i>K calculé à partir des courbes contrainte-déformation</i>							
$K_{dév}$	0	5.09±1.43	5.09±9.00	5.23±0.29	4.88±1.85	3.29±0.28	-
	1	7.04±1.38	3.29±0.36	7.90±4.41	11.83±7.45	5.29±1.37	-
	3	10.02±5.47	13.53±5.85	19.30±9.46	13.92±4.89	14.90±7.88	-
<i>K mesuré à partir des courbes de compression isotrope</i>							
K_{Pcol}		2.9	-	6.4 à 9.7	-	3.1	-

Le « pore collapse » est LE phénomène typique du comportement hydrostatique des craies (Xie et Shao 2006, Xie 2005, Schroeder 2003, Schroeder 2002, Homand et Shao 2000c, Schroeder 1995, Dahou et al. 1995, Monjoie et al. 1990) et se vérifie plutôt bien pour les trois craies étudiées (notamment pour Estreux dont le seuil P_{col} est similaire à celui trouvé par Nguyen 2009).

L'effondrement du réseau poreux affecte préférentiellement certaines zones : les déformations plastiques sont d'autant plus importantes que la craie est poreuse et l'occurrence du phénomène n'a pas d'influence sur la valeur du coefficient de compressibilité de la matrice rocheuse. La perte de l'isotropie mécanique peut être expliquée par ce phénomène.

L'effondrement des pores implique que le squelette de la craie peut être considéré comme incompressible et que son coefficient de Biot¹⁶ est très proche de 1: les craies de Lezennes et de Lixhe possèdent respectivement un coefficient de Biot de 0.96 et de 0.87 et un seuil de « pore collapse » de 13 et 16 MPa (Homand et Shao 2000a, Skoczylas et Shao 1998, Dahou et al. 1995, Gourri 1991). Cette corrélation est valable pour les craies d'Estreux et de Château-Landon mais non valable pour la craie de Saint-Martin-le-Noeud. Là où les deux premières correspondent à ce qui avait été avancé par Monjoie et al. 1990 (sur la relation seuil de « pore collapse »-porosité) n'est pas applicable à la dernière même si le phénomène est avéré.

La disparité observée pour la craie de Saint-Martin-le-Noeud par rapport aux connaissances de la littérature implique, comme pour le comportement déviatorique, que les liaisons entre grains de la craie dolomitique sont plus nombreuses ou d'une

¹⁶ Pour rappel, la détermination du coefficient de Biot et du module de Biot n'a cependant pas pu être réalisée au cours de cette thèse, en raison de difficultés expérimentales.

nature différente (énergie de liaison plus importante) de ses comparses pure et glauconieuse, même si cette nature n'a pu être mise en évidence par l'imagerie MEB.

III.5. CONCLUSION

Dans ce travail, un grand nombre d'essais mécaniques ont été effectués sur les trois craies étudiées. L'effondrement du milieu poreux a été observé conformément à ce qu'est annoncé dans la littérature, tout comme l'effet de l'eau sur le comportement mécanique.

Une étude des propriétés physiques des trois craies a été effectuée en confrontant les diverses valeurs à celles de la bibliographie. Il s'avère que ces craies structurellement isotropes ont des minéralogies différentes amenant à des textures – ou assemblage de minéraux – différentes. Par conséquent, leur milieu poreux ne se comporte pas tout à fait de la même façon face à l'eau (interactions eau-craie) :

- la craie glauconieuse (Estreux) a la granulométrie la moins homogène (texture packstone). Elle est également la moins poreuse (35 %) et comporte une part importante de matériel argileux. Le phénomène prédominant dans l'interaction eau-craie est la physisorption ;
- la craie dolomitique (Saint-Martin-le-Noëud) a un réseau poreux peu tortueux (avec une texture wackestone) et une porosité supérieure à 40 %. Le phénomène prédominant dans l'interaction eau-craie est la capillarité (plus d'eau libre que d'eau adsorbée) devant le phénomène de physisorption ;
- la craie pure (Château-Landon) a le réseau poreux le plus homogène (avec une texture mudstone) et une porosité supérieure à 40 %. L'interaction eau-craie se caractérise par un état intermédiaire entre les deux autres craies (phénomènes de physisorption et de capillarité).

De même, une étude des propriétés mécaniques de chaque craie en fonction de l'hygrométrie a été effectuée. Quelques caractères peuvent être soulignés :

- les différents seuils (initiation, rupture, ...) lorsqu'ils sont mesurés varient en fonction de l'hygrométrie quelle que soit la craie et pour un confinement donné ;
- le domaine élastique diminue également en fonction de l'hygrométrie ;
- les différents seuils ont tendance à voir leur valeur augmenter en fonction du confinement pour une même hygrométrie et ce, quelle que soit la craie. Le comportement post-pic radoucissant observé pour les craies tend vers une plasticité sans écrouissage lorsque le confinement augmente (ce qui est commun à la plupart des géomatériaux en exhibant une transition entre une rupture fragile et un comportement ductile). À l'état sec, un comportement ductile est observé pour une pression de confinement de 1 MPa pour la craie de Château-Landon et de 3 MPa pour les autres craies.
- les module de Young et coefficient de Poisson de la craie dolomitique ne sont influencées ni par l'hygrométrie ni par le nombre de cycles (contrairement à la

craie d'Estreux). Cette craie présente un comportement de type élasto-fragile à faible confinement et la craie d'Estreux un comportement plutôt ductile (d'autant plus accentué que le confinement augmente) ;

- la craie de Château-Landon passe d'un comportement élasto-fragile à l'état sec (sans confinement) à un comportement ductile à l'état saturé avec une diminution très importante de sa résistance à la compression uniaxiale.

Les résultats sont conformes à ceux décrits dans la littérature sur la phénoménologie générale du comportement mécanique des craies. Les trois craies présentent un comportement élastoplastique sous chargement déviatorique.

Cependant, il a été montré que la capillarité n'était pas le seul moteur de la diminution des propriétés physiques des craies, mais surtout, potentiellement pas le premier en raison des différences observées pour les trois craies. De ce fait, l'étude permet d'avancer l'hypothèse de la prépondérance de l'énergie de liaison entre grains sur la porosité de la craie pour la régence du comportement mécanique.

Chapitre IV : Étude du « vieillissement » des craies à l'échelle du pilier

Résumé :

Le présent chapitre se propose de répondre à la problématique posée par un possible vieillissement de la craie dans le cadre des carrières souterraines à travers les questionnements suivants :

- *Comment cela se traduirait-il et pourquoi ?*
- *Quel serait le possible rôle de l'eau dans le mécanisme de vieillissement ?*
- *Quelles seraient les conséquences sur la stabilité des carrières souterraines dans le cas d'un vieillissement de la craie ?*

Ce chapitre permet d'une part de répondre à la problématique posée, mais également d'exposer les mécanismes possibles impliqués ainsi que les conditions d'application.

Mots-clés : *craie, altération, carrières souterraines, comportement mécanique, vieillissement*

IV.1. INTRODUCTION

Le vieillissement fait partie intégrante de la vie d'un minerai exploité : il caractérise l'évolution des propriétés de la roche suite à son exploitation – en milieu anthropisé. Dans le cas des carrières souterraines, l'Homme en creusant des galeries change l'état de contrainte s'exerçant sur la roche – sur les piliers en particulier, parfois son état hydrique, rajoute de l'endommagement et de ce fait rajoute des instabilités supplémentaires à celles induites par l'évolution naturelle dans le temps de la roche.

Cet ajout d'instabilités et l'urbanisation massive des terrains sus-jacents peuvent avoir des conséquences – humaines et matérielles – néfastes. Les accidents sont le plus souvent imprévisibles à la fin de l'exploitation. Malheureusement, l'Homme le plus souvent dans ses projets de construction ne se projette que quelques décennies dans le futur en ne tenant compte que du comportement présent du matériau. Or pour comprendre le comportement présent – et futur – du matériau, on ne peut faire abstraction de son histoire passée au travers des temps géologiques depuis sa formation, son exploitation et ses contacts avec les divers agents d'altération. Plusieurs études ont été effectuées précédemment (Sorgi et De Gennaro 2011, Nguyen 2009, Sorgi et De Gennaro 2006, Sorgi et Auvray 2005), mais n'ont traité qu'une partie du vieillissement de la craie à savoir l'influence du principal agent d'altération – à savoir l'eau – mais n'ont pas traité la manière dont le vieillissement ou l'endommagement pouvait se manifester à l'échelle du pilier de carrière.

Cette étude a donc pour but de caractériser les phénomènes de vieillissement et d'endommagement prenant place dans la craie à l'échelle d'un pilier de carrière souterraine. Elle s'appuie sur des photographies prises au Microscope électronique à Balayage (MEB) et des mesures de vitesse, de masses volumiques et de résistance, et ce du bord au cœur d'un pilier de chacune des trois carrières. Il est important cependant de rappeler qu'à l'échelle du massif c'est l'ensemble matrice+fracturation qui peut donner le degré d'altération/endommagement de la craie. L'étude des propriétés de la matrice rocheuse est effectuée en laboratoire et l'étude de la fracturation est effectuée *in situ*.

IV.2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

IV.2.1. Méthode de prélèvement et de préparation des échantillons

La méthode de prélèvement présentée ci-après a déjà été éprouvée dans des travaux antérieurs sur l'étude du vieillissement des roches, en particulier sur le gypse (Auvray 2003) et le minerai de fer (Grgic 2001).

Le principe de ces prélèvements est d'effectuer des sondages horizontaux de $\varnothing=120$ mm dans un pilier de carrière (voir plans au Chapitre II) à diverses hauteurs et diverses profondeurs. La Figure IV.1 donne un exemple de disposition des forages effectués et des carottes prélevées dans la carrière de Saint-Martin-le-Nœud.

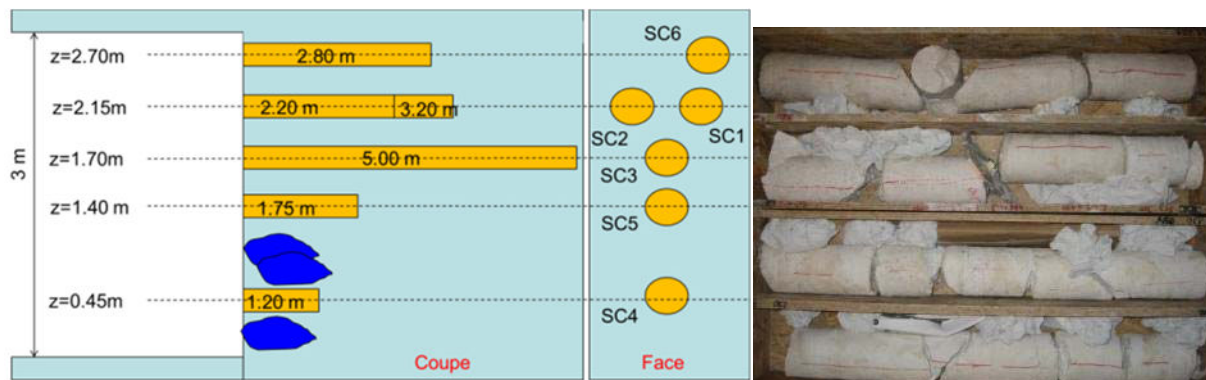


Figure IV.1 : Localisation des divers sondages carottés réalisés dans le pilier de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud (les carottes proviennent du sondage SC3)

Les prélèvements se font à l'aide d'un carottier et à l'eau pour les trois carrières. La descente dans ces sites est soumise à restriction soit pour des raisons de sécurité (la carrière d'Estreux dégage de fortes doses de radon pendant la période hivernale) soit pour des raisons écologiques (les carrières de Saint-Martin-le-Nœud et de Château-Landon abritent diverses espèces de chiroptères). Les sondages utilisés dans l'étude ont les caractéristiques suivantes :

- Saint-Martin-le-Nœud (Campagne de prélèvements de 2012) : le pilier choisi pour les prélèvements est situé près de l'entrée principale dans la zone du lac des piliers (cf. § II.2.2.) ;
 - SC1 : 2.20 m de longueur à 2.15 m de hauteur par rapport au mur de carrière ;
 - SC3 : 5.00 m de longueur à 1.70 m de hauteur par rapport au mur de carrière. Ce sondage a la particularité d'être presque traversant ;
- Estreux (Campagne de prélèvements de 2013) : le pilier choisi pour les prélèvements est situé proche du puits de descente sur le bord de l'autoroute A2. Les sondages traversent une zone faillée ;
 - SC1 : 3.20 m de longueur à 0.76 m par rapport au toit de carrière ;
 - SC3 : 3.20 m de longueur à 1.67 m par rapport au toit de carrière ;
- Château-Landon (Campagne de prélèvements de 2014) : Les piliers choisis pour effectuer les prélèvements sont situés à 20 ou 30 m de l'entrée de la carrière.

Des échantillons de roche sont ensuite prélevés perpendiculairement à l'axe du sondage tous les 10 cm. Chacun des échantillons est ensuite rectifié de façon à ce que les éprouvettes résultantes aient un diamètre de 20 mm et un élançement de 2. Les échantillons sont ensuite instrumentés de jauges d'extensométrie disposées en rosette (voir § III.3.1.1.) sauf dans le cas de la craie de Château-Landon pour qui l'instrumentation est délicate et plus particulièrement à cette échelle (les raisons ont déjà été exposées en § III.3.1.2.).

À chaque profondeur correspond 1 ou 2 échantillons dans les états sec et saturé. La méthode de saturation est la même que celle exposée au Chapitre III.

IV.2.2. Observations des échantillons au Microscope Électronique à Balayage (MEB)

Les chutes issues du carottage sont usinées dans l'optique d'obtenir des photographies MEB à intervalle régulier dans le pilier. Elles sont polies puis recouvertes de carbone puis passées au MEB. La texture extrêmement friable de la craie de Château-Landon impose l'application d'une résine sur l'échantillon avant la métallisation. Ces photographies ont été effectuées au sein du laboratoire GeoRessources et permettent de donner une image qualitative de la structure de la craie à telle profondeur dans le pilier et ainsi faire état des possibles différences structurales rencontrées.

IV.2.3. Propriétés physiques

Chacun des échantillons prélevés voit ses propriétés physiques déterminées :

- les masses volumiques sèche et humide ainsi que la teneur en eau sont déterminées selon les méthodes exposées au § III.2.1.1. sur tous les échantillons ; la mesure des masses volumiques de grains se fait à intervalle régulier sur des chutes de carottage ;
- la mesure de vitesse des ondes de compression P est effectuée sur tous les échantillons saturés selon la méthode exposée au § III.2.1.2. ;
- deux types de mesures de porosité ont été effectuées : une porosité mesurée au porosimètre à mercure effectuée tous les 50 cm et une porosité calculée en fonction des pesées sur les échantillons saturés (méthodes exposées au § III.2.1.3.). La porosimétrie au mercure est intéressante ici en partie pour voir l'évolution qualitative de la tortuosité du milieu poreux entre le bord et le cœur de pilier (rapport entre porosité libre et porosité piégée).

IV.2.4. Propriétés mécaniques

Chacun des échantillons est ensuite utilisé pour les essais de compression uniaxiale. En raison des dimensions des échantillons, les essais sont effectués à l'aide d'un micro-indenteur possédant une capacité de 5 kN (photographie en Figure IV.2). Une cale cylindrique plate a été spécialement usinée pour s'adapter au micro-indenteur et effectuer des essais de compression simple sur les échantillons de petit diamètre. Les essais sont tous pilotés avec une vitesse de déformation correspondant à une

vitesse de déplacement de 30 $\mu\text{m}/\text{mn}$ pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud et de 45 $\mu\text{m}/\text{mn}$ pour la craie de Château-Landon. Les essais sont programmés pour effectuer 5 cycles (environ tous les 0.5 kN) et une relaxation avant un déchargement (comme en § III.3.1.2.).

Les propriétés mécaniques obtenues pour chaque profondeur à partir de ces essais sont la résistance à la compression uniaxiale et les modules de l'enveloppe. Dans les cas où les échantillons sont instrumentés de jauges (craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud), les modules de Young, coefficients de Poisson et différents seuils lorsqu'ils sont atteints (dilatance, plasticité, résiduel...) sont déterminées à partir des courbes contrainte-déformation.



*Figure IV.2 : Dispositif expérimental pour les essais de mini-compression uniaxiale.
Utilisation du micro-indenteur*

IV.2.5. Étude de la fracturation au sein du pilier

L'étude de la fracturation s'effectue par l'inventaire de la position des fractures verticales au sein du pilier. Les carottes extraites sont pour certaines fracturées. Cependant l'origine de ces fractures, qu'elle soit naturelle ou induite par le carottage, n'est que difficilement appréciable sur les carottes. Par conséquent, l'étude de la fracturation se fait directement dans les trous de forage.

Le principe consiste à introduire dans les trous de forages horizontaux un rail gradué sur lequel est fixée une caméra haute définition (HD). Le rail est fixé de façon à ce que son axe soit confondu avec celui du sondage. Cette caméra a la possibilité, selon la demande, de se déplacer d'un bout à l'autre du sondage mais également d'effectuer une rotation complète autour de l'axe du rail.

En connaissant la profondeur dans le pilier de chaque fracture et l'orientation de la caméra, il est donc possible de recouper les données obtenues dans les différents sondages et de replacer avec précision les fractures au sein du pilier.

IV.3. RÉSULTATS

Cette partie n'a pour vocation que de présenter les divers résultats obtenus de manière purement factuelle. Toute l'interprétation et la discussion autour de ces résultats d'essai se trouve dans le §**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** IV.4.

IV.3.1. Craie de Saint-Martin-le-Noeud

IV.3.1.1 Observations au MEB

La Figure IV.3. présente des photographies prises au MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier de la carrière de Saint-Martin-le-Noeud. La première remarque à apporter est qu'un changement de la forme et de la taille des grains en fonction de la profondeur est clairement observable (Figure IV.3 a à e).

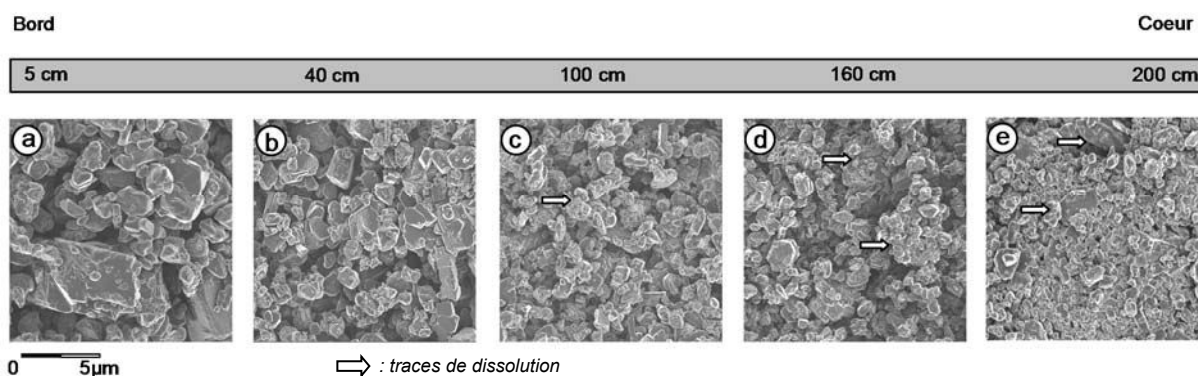


Figure IV.3 : Photographies MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier. Craie de Saint-Martin-le-Noeud

En bord de pilier (Figure IV.3 a), les « gros »¹⁷ cristaux de calcite (de taille multimicrométrique) observés se présentent sous leur forme propre, à savoir une forme rhomboédrique caractéristique de ce carbonate. Ces cristaux sont parfaitement formés avec des faces planes et des arêtes bien définies, sans aucune trace de dissolution ou de néo-précipitation. De plus, la texture de la craie ne paraît pas très homogène. En revanche, en cœur de pilier (Figure IV.3e), les « petits » cristaux de calcite (de taille micrométrique) cette fois-ci ne présentent pas de forme propre : leurs faces comme leurs arêtes ne sont pas définies. Cet aspect « grignoté » ne peut qu'être le fruit d'une dissolution partielle de ces cristaux. De plus, il apparaît que les rares « gros » cristaux observables au milieu de cet amas de « petits » cristaux en cœur de pilier présentent davantage de microfractures et de traces de dissolution que ceux présents en bord de pilier. On rajoutera que la texture de la roche paraît beaucoup plus homogène qu'en bord. Cependant, malgré ces disparités notoires dans la taille et la forme des cristaux en bord et cœur de pilier, il n'a pas été possible d'établir une délimitation spatiale de ces différences au sein du pilier : l'évolution de la taille et de la forme des cristaux (comme la texture de la

¹⁷ Les termes « gros » et « petits » ne sont utilisés ici que pour apprécier de manière qualitative la différence de taille des cristaux observés par rapport à l'échelle donnée et de pouvoir les discriminer par la suite.

roche) est parfaitement continue du bord au cœur de pilier. La distinction d'une possible frange de dissolution n'est donc pas possible.

IV.3.1.2 Propriétés physiques et mécaniques

IV.3.1.2.1 Propriétés physiques

La Figure IV.4 présente les différentes masses volumiques de la craie dolomitique en fonction de sa profondeur dans le pilier et de son état hydrique (sec ou saturé). Comme le sondage SC3 est presque traversant et d'une largeur de 5 m, les données ont été reportées sur les graphiques en fonction de leur distance aux parements (d'un côté et de l'autre du pilier). La Figure IV.5 présente les vitesses V_p des ondes P (effectuées uniquement sur le sondage SC1) ainsi que les teneurs en eau w et la porosité accessible à l'eau n des deux sondages.

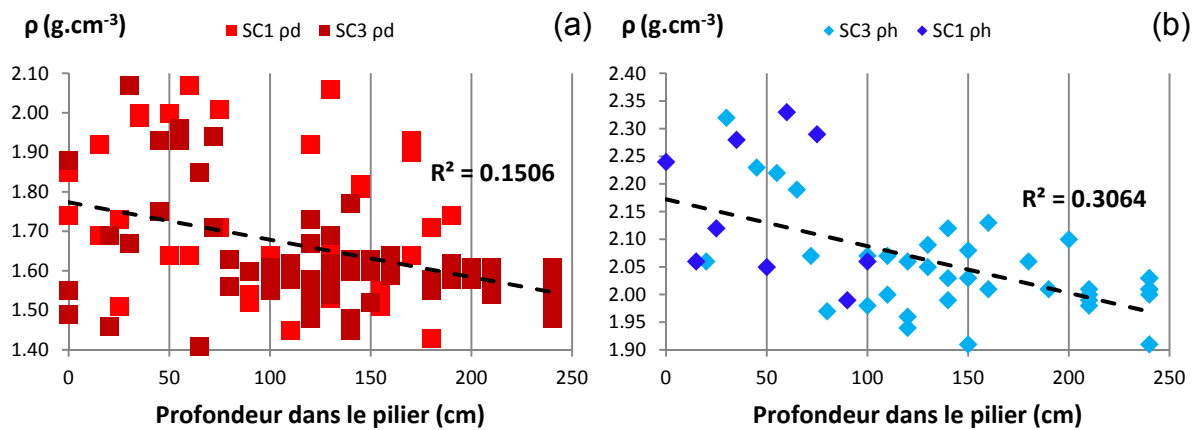


Figure IV.4 : Impact du vieillissement/endommagement sur les masses volumiques ρ (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Noëud

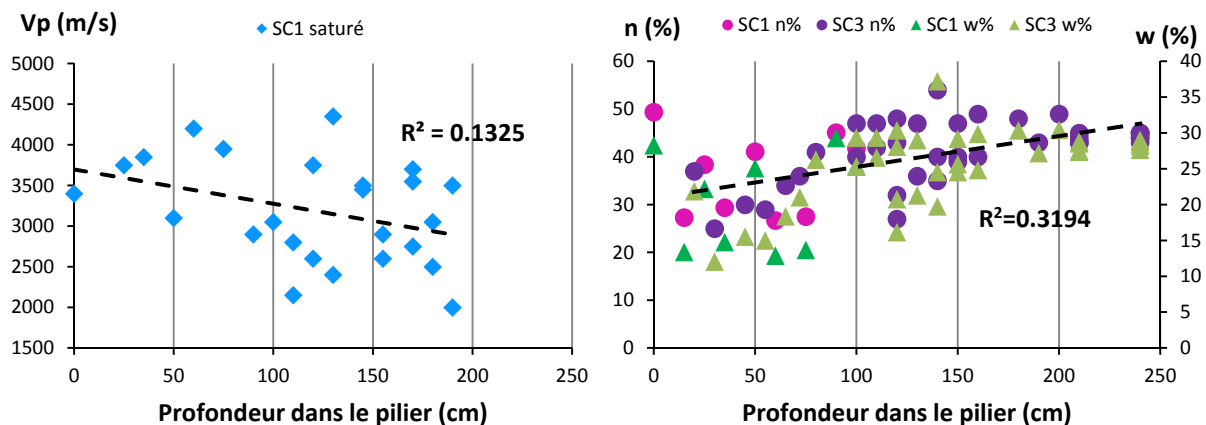


Figure IV.5 : Impact du vieillissement/endommagement sur la vitesse V_p des ondes de compression P (échantillons saturés), la teneur en eau w et la porosité accessible à l'eau n en fonction de la profondeur. Synthèse des deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Noëud

La Figure IV.6 représente l'impact du vieillissement/endommagement sur les valeurs de porosités libre $n_{Hg,lib}$, totale $n_{Hg,tot}$ et piégée $n_{Hg,piég}$ de la craie de Saint-Martin-le-Nœud en fonction de la profondeur dans le pilier. Cette figure permet d'apprécier une certaine évolution de la tortuosité (facilité des fluides à circuler au sein du milieu poreux).

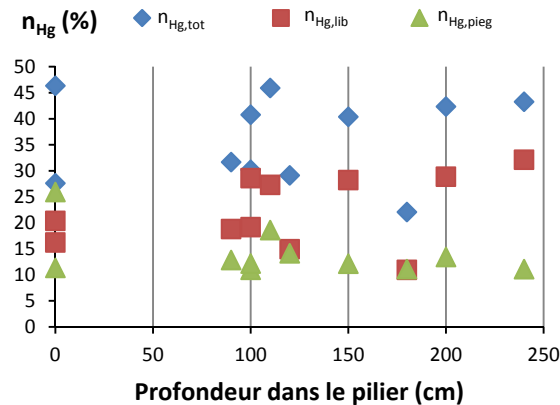


Figure IV.6 : Impact du vieillissement/endommagement sur les porosités totale, libre et piégée mesurées au porosimètre à mercure en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

Les résultats obtenus pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud permettent de statuer l'impact du vieillissement/endommagement sur les propriétés physiques de la craie :

- les masses volumiques sèche et saturée, la porosité accessible à l'eau n et la teneur en eau augmentent globalement en fonction de la profondeur dans le pilier. Cependant, on observe un changement de variation dans le groupe de points à 75 cm. Ce qui permet de scinder les résultats en deux groupes :
 - du bord de pilier à 75 cm, les masses volumiques sèche et saturée diminuent alors que la porosité accessible à l'eau et la teneur en eau augmentent ;
 - de 75 cm au cœur de pilier, les quatre propriétés physiques forment globalement un plateau ;
- la porosité totale au mercure $n_{Hg,tot}$ et la porosité piégée $n_{Hg,piég}$ diminuent en fonction de la profondeur (la première légèrement et la seconde plus franchement) alors que la porosité libre $n_{Hg,lib}$ présente la tendance inverse. Cette constatation est plutôt cohérente avec ce qu'avait montré l'imagerie MEB et implique que les fluides ont plus de facilité à circuler au sein de la matrice de la craie en cœur qu'en bord ;
- malgré une dispersion conséquente, la vitesse des ondes de compression P diminue en fonction de la profondeur.

Les tendances observées au travers de ces résultats sont cohérentes les unes avec les autres et sont corrélées avec les variations de texture observées à l'imagerie MEB. Dès lors, ils forment avec les photographies MEB un ensemble cohérent et indéfectible.

IV.3.1.2.2 Propriétés mécaniques

La Figure IV.7 présente l'impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression uniaxiale de la craie de Saint-Martin-le-Nœud en fonction de la profondeur dans le pilier. La Figure IV.8 présente l'évolution du module de Young (lorsque celui-ci a pu être mesuré) en fonction de la profondeur dans le pilier.

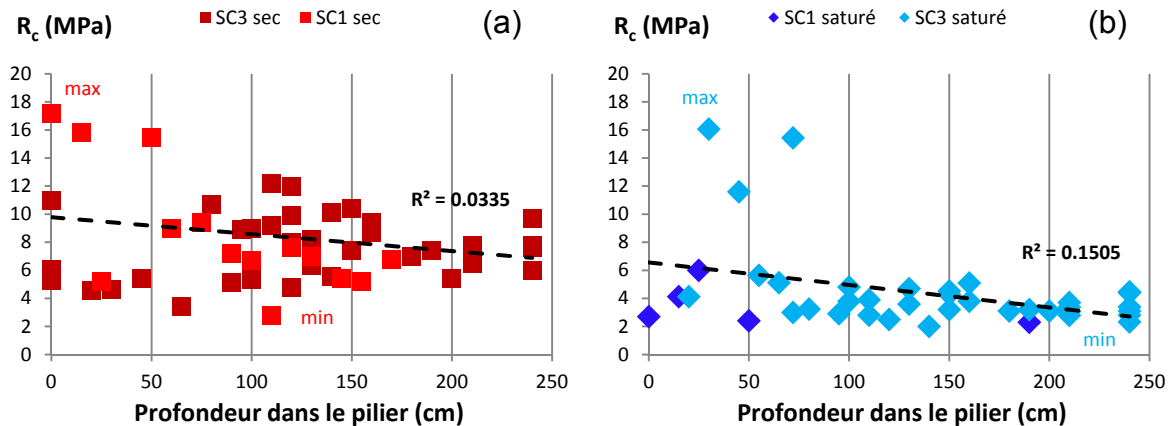


Figure IV.7 : Impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression uniaxiale (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

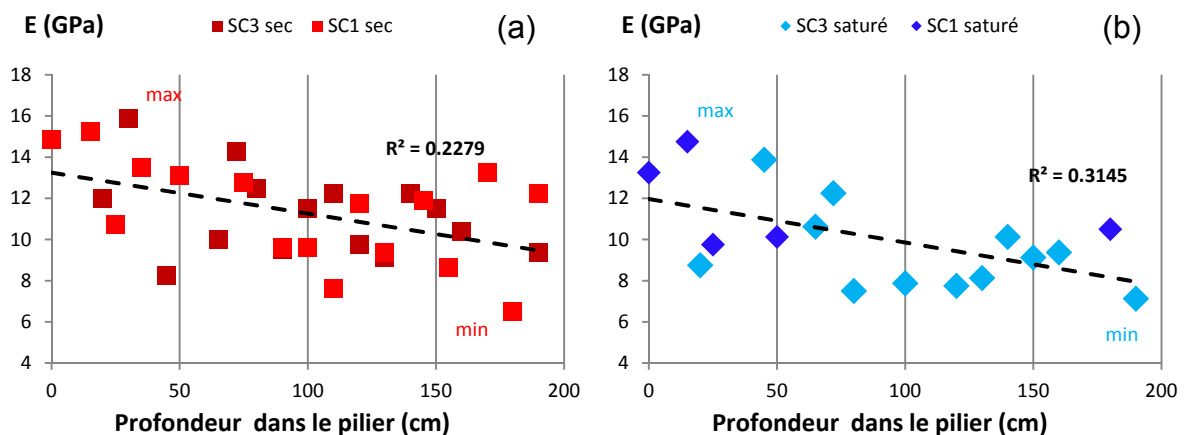


Figure IV.8 : Impact du vieillissement/endommagement sur le module de Young E dans les cas (a) sec et (b) saturé en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

Les résultats obtenus pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud permettent de statuer l'impact du vieillissement/endommagement sur les propriétés mécaniques de la craie dolomitique :

- les résistances en compression uniaxiale dans les états sec et saturé varient en fonction de la profondeur dans le pilier (particulièrement pour SC1). On

observe comme pour les propriétés physiques un changement de variation mais cette fois-ci à 50 cm de profondeur. Ce qui permet encore une fois de scinder les résultats (ici de SC3) en deux groupes :

- du bord de pilier à 50 cm, les données sont assez chaotiques. Les données de SC3 sont plus faibles que celles de SC1 et se présentent sous la forme d'un plateau ;
- de 50 cm au cœur de pilier, la résistance à l'état sec diminue globalement (SC1 et SC3) et présente moins de dispersion dès lors que l'on se rapproche du cœur (particulièrement SC3). De plus, dans l'état saturé, celle-ci diminue avec des valeurs de 2 à 3 plus faibles que celles obtenues dans le premier domaine (0 à 50 cm) ;
- les modules de Young, que ce soit dans l'état sec ou l'état saturé, diminuent en fonction de la profondeur. De plus, la différence est faible, pour une profondeur donnée, dans sa valeur entre les deux états. Cette constatation est cohérente avec les résultats obtenus dans le Chapitre III.

Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux obtenus pour les propriétés physiques de cette craie (§ IV.2.3).

IV.3.1.3 Fracturation du pilier

La méthode exposée en § IV.2.5 nous a permis de représenter la fréquence des fractures sous la forme d'une illustration présentée en Figure IV.9.

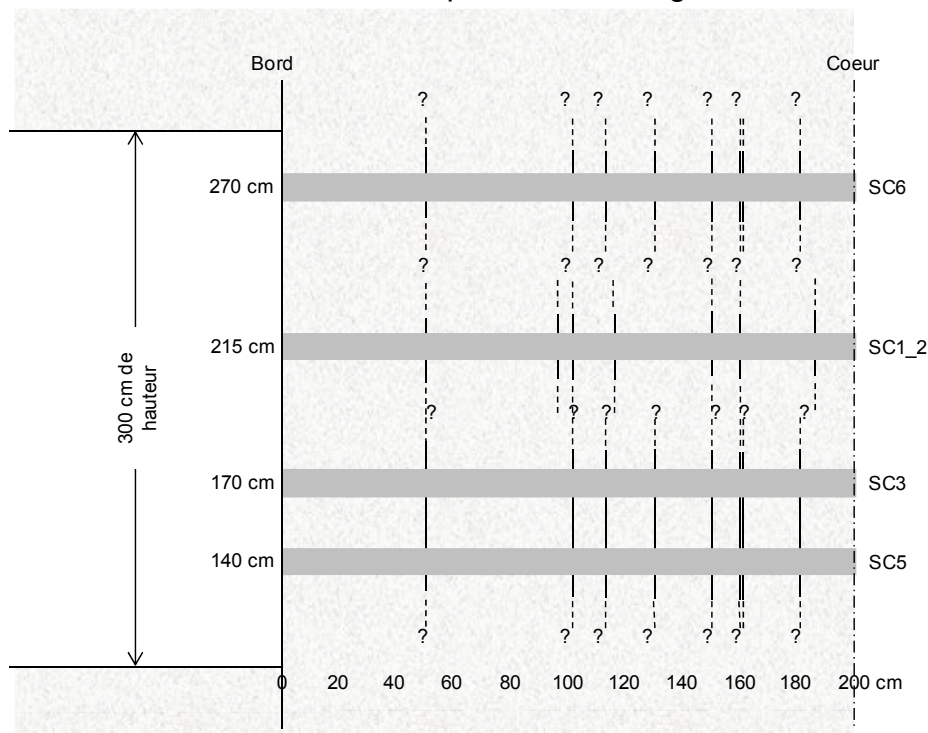


Figure IV.9 : Espacement des fractures verticales en fonction de la profondeur au sein du pilier de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Les sondages ont été replacés le long de la hauteur de galerie (du mur au toit)

Selon ces mesures, il apparaît que les fractures verticales sont beaucoup plus espacées en bord qu'en cœur de pilier. La variation est parfaitement nette.

IV.3.2. Craie d'Estreux

IV.3.2.1 Observations au MEB

La Figure IV.10 présente des photographies prises au MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier de la carrière d'Estreux.

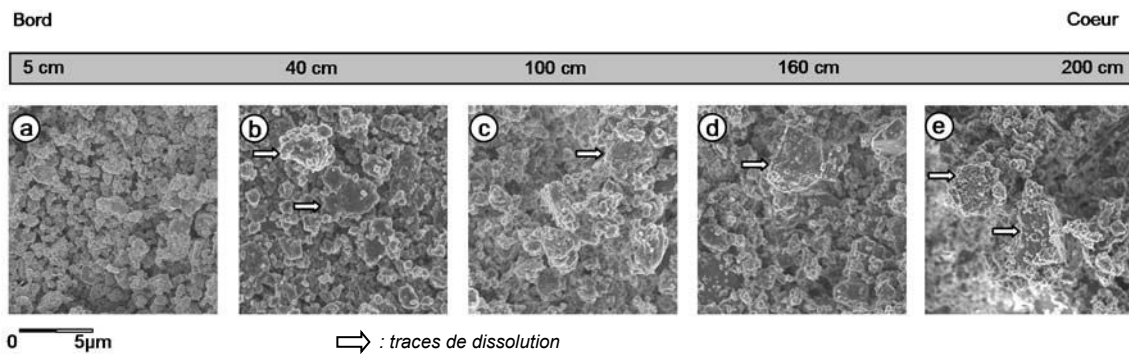


Figure IV.10 : Photographies MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier. Craie d'Estreux

Contrairement à ce qu'il a pu être observé pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud, aucun changement de forme et de taille (sauf entre 0 et 40 cm) des grains en fonction de la profondeur n'est observable. La texture de la craie est similaire à ce qu'il a été observé au cœur du pilier de Saint-Martin-le-Nœud (voir Figure IV.3 e au § IV.3.1.1). On remarque cependant qu'un certain nombre de grains présentent des traces de dissolution (Figure IV.10 d et e) au-delà de 40 cm de profondeur.

IV.3.2.2 Propriétés physiques et mécaniques

IV.3.2.2.1 Propriétés physiques

La Figure IV.11 présente les différentes masses volumiques de la craie glauconieuse en fonction de sa profondeur dans le pilier et de son état hydrique (sec ou saturé).

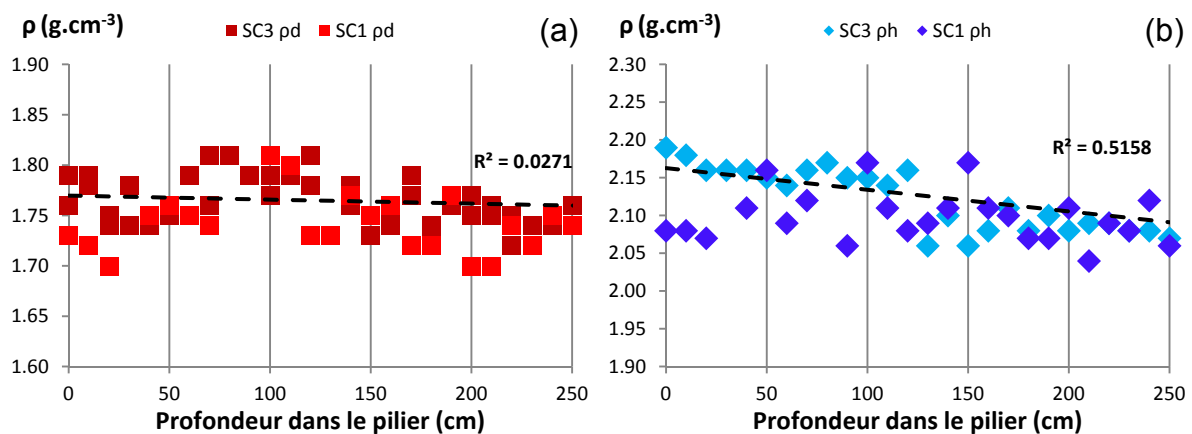


Figure IV.11 : Impact du vieillissement/endommagement sur les masses volumiques (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages.

Craie d'Estreux

La première remarque à apporter est qu'il y a moins de dispersion ici que pour les résultats de la craie dolomitique et que les variations ne sont pas aussi franches.

La Figure IV.12 présente les vitesses V_p des ondes P et les teneurs en eau w et la porosité accessible à l'eau n des deux sondages.

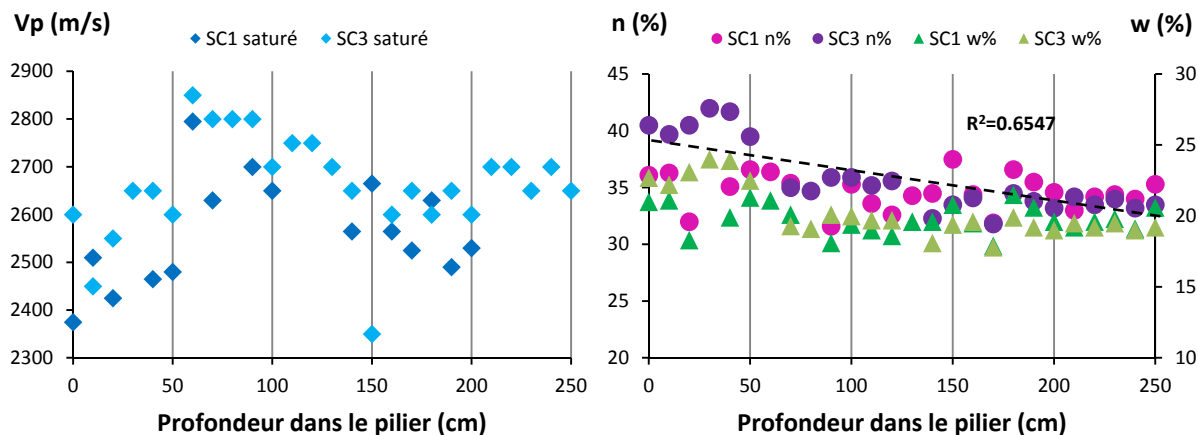


Figure IV.12 : Impact du vieillissement/endommagement sur la vitesse V_p des ondes de compression P (échantillons saturés), la teneur en eau w et la porosité accessible à l'eau n en fonction de la profondeur. Synthèse des deux sondages. Craie d'Estreux

Les résultats obtenus pour la craie d'Estreux permettent de statuer l'impact du vieillissement/endommagement sur les propriétés physiques de la craie :

- les variations des masses volumiques sèche et saturée, de la porosité accessible à l'eau n et de la teneur en eau sont continues de 50 cm au cœur de pilier. Les valeurs de ces paramètres sont plus dispersées sur les 50 premiers centimètres ;
- la vitesse des ondes P diminue globalement en fonction de la profondeur mais observe deux changements de variation à 50 et 150 cm : elle augmente à partir du bord jusqu'à 50 cm puis diminue jusqu'à 150 cm. Elle forme un plateau de 150 cm jusqu'au cœur.

Les tendances observées au travers de ces résultats sont cohérentes les unes avec les autres ainsi qu'avec les variations de texture observées à l'imagerie MEB.

IV.3.2.2.2 Propriétés mécaniques

La Figure IV.13 présente l'impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression uniaxiale de la craie d'Estreux en fonction de la profondeur dans le pilier. La Figure IV.14 présente l'évolution du module de Young (lorsque celui-ci a pu être mesuré) en fonction de la profondeur dans le pilier.

La Figure IV.15 quant à elle présente l'évolution du seuil de dilatance σ_D et de la contrainte résiduelle σ_R en fonction de la profondeur dans le pilier, lorsque ceux-ci ont pu être observés.

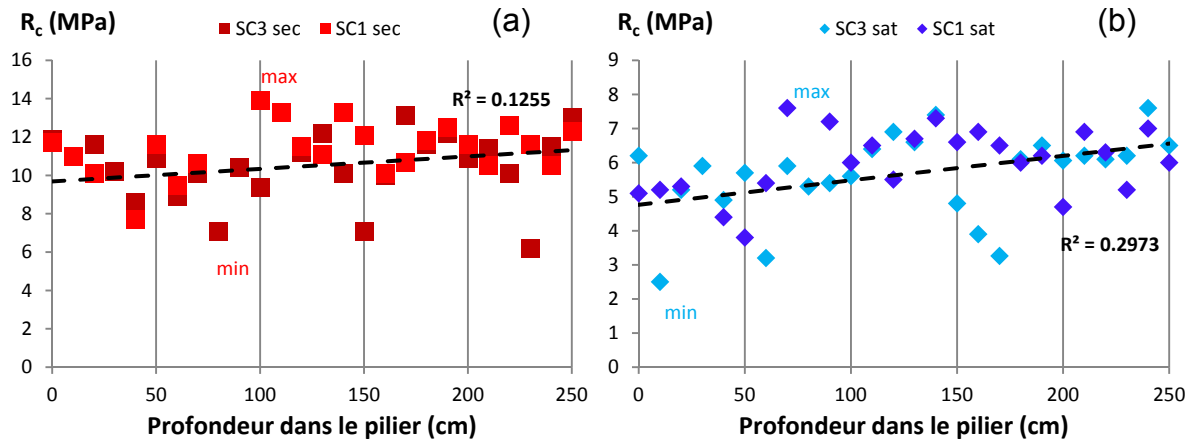


Figure IV.13 : Impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression sèche et saturée en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie d'Estreux

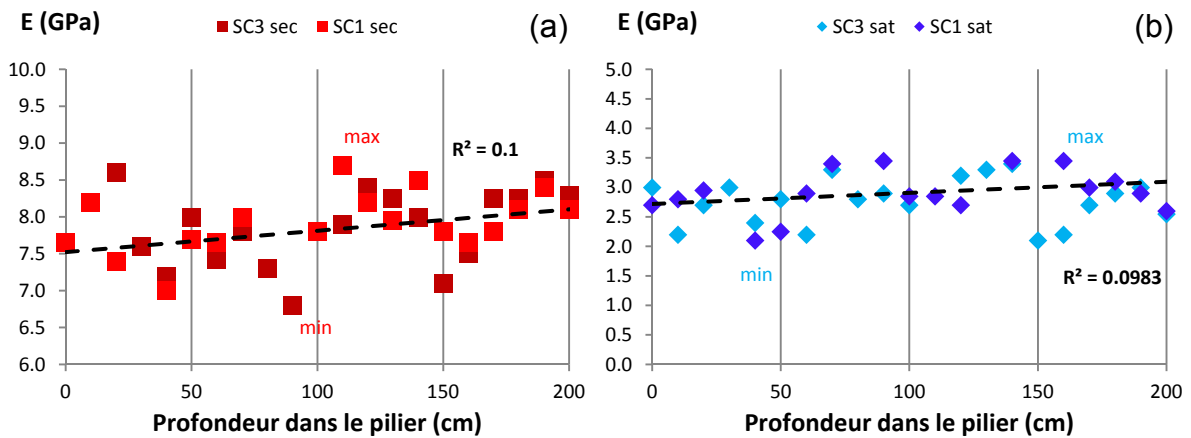


Figure IV.14 : Impact du vieillissement/endommagement sur le module de Young E dans les cas (a) sec et (b) saturé en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie d'Estreux

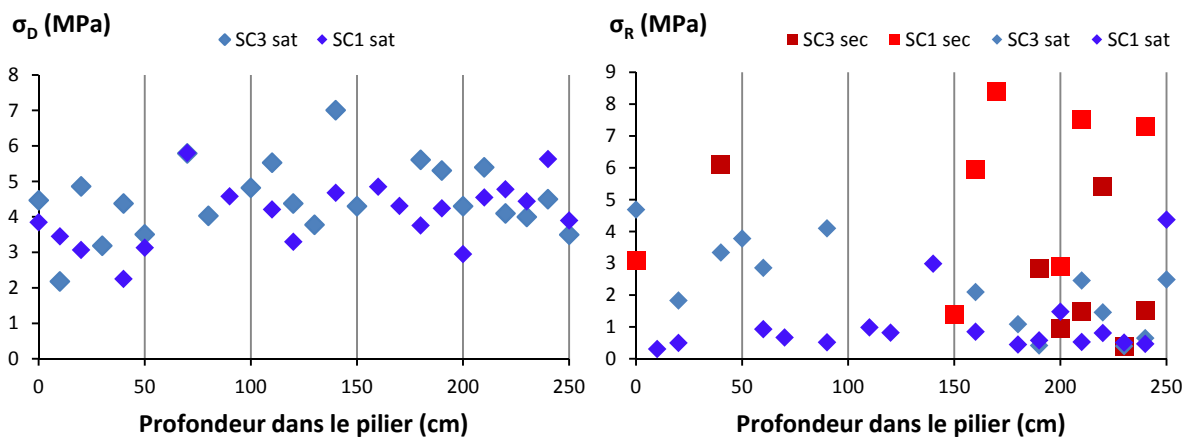


Figure IV.15 : Impact du vieillissement/endommagement sur le seuil de dilatance σ_D (échantillons saturés) et sur les valeurs de contrainte résiduelle σ_R (comportement post-pic) en fonction de la profondeur. Synthèse de deux sondages. Craie d'Estreux

Les résultats obtenus pour la craie d'Estreux permettent de statuer l'impact du vieillissement/endommagement sur les propriétés mécaniques de la craie glauconieuse :

- les résistances en compression uniaxiale, les valeurs au seuil de dilataance σ_D dans les états sec et saturé augmentent avec la profondeur dans le pilier. Il est à noter que leur évolution est globalement continue et en particulier pour SC3. Les valeurs correspondant à SC1 sont discontinues et présentent un saut au niveau de la limite des 50 cm de profondeur ;
- les modules de Young, que ce soit dans l'état sec ou l'état saturé, augmentent en fonction de la profondeur. Leur évolution est continue du bord au cœur de pilier. De plus, la valeur à sec est 2 à 3 fois plus importante que la valeur en saturé (pour une profondeur donnée). Cette constatation est cohérente avec les résultats obtenus dans le Chapitre III ;
- la contrainte résiduelle σ_R dans le cas saturé tend à diminuer dès lors que l'on s'enfonce dans le pilier pour SC3 (les valeurs correspondant à SC1 forment un plateau). Ces valeurs sont cependant très dispersées à l'état sec.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour les propriétés physiques de cette craie (§ IV.2.3).

IV.3.2.3 Fracturation du pilier

La méthode exposée en § IV.2.5 nous a permis de représenter la fréquence des fractures sous la forme d'une illustration présentée en Figure IV.16.

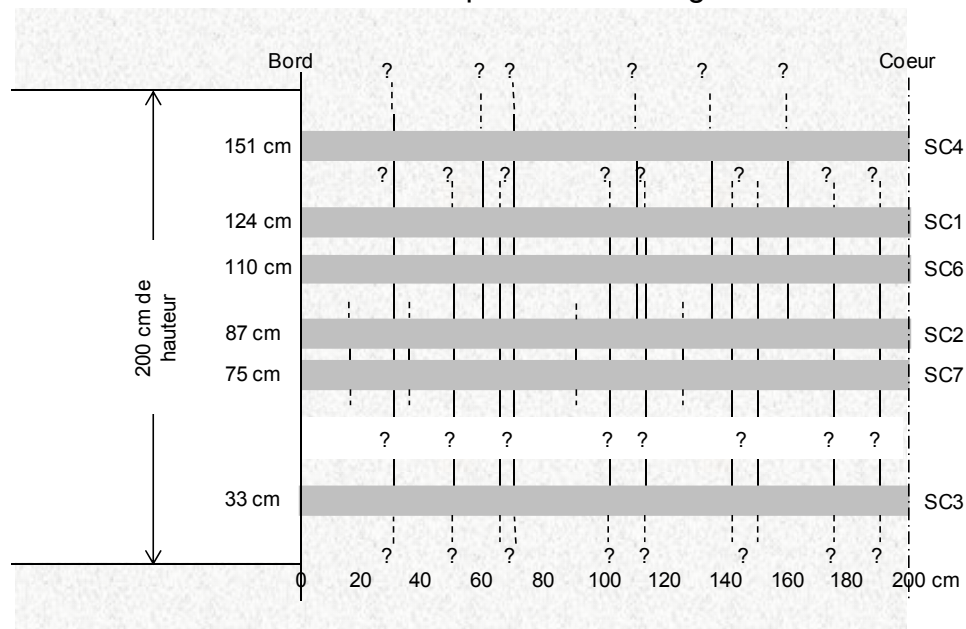


Figure IV.16 : Espacement des fractures verticales en fonction de la profondeur au sein du pilier de la carrière d'Estreux. Les sondages ont été replacés le long de la hauteur de galerie (du mur au toit)

Selon ces mesures, il apparaît que les fractures verticales sont espacées de façon régulière tout le long des sondages.

IV.3.3. Craie de Château-Landon

IV.3.3.1 Observations au MEB

La Figure IV.17 présente des photographies prises au MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier de la carrière de Château-Landon.

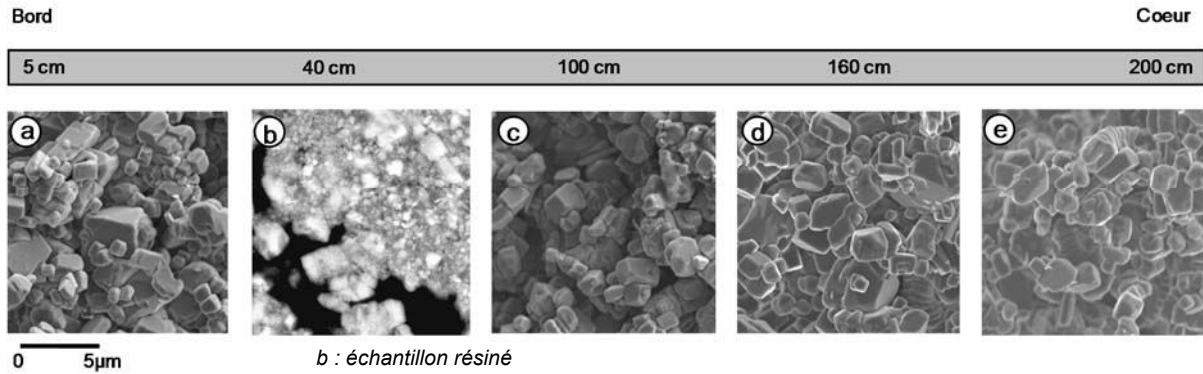


Figure IV.17 : Photographies MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier. Craie de Château-Landon

Contrairement à ce qui a pu être observé pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud mais comme dans le cas de la craie d'Estreux, aucun changement de forme et de taille des grains en fonction de la profondeur n'est pour ainsi dire observable. Néanmoins, contrairement à la craie d'Estreux, la texture de la craie est similaire d'un bout à l'autre du sondage. On remarque cependant qu'un certain nombre de grains de taille différente semblent s'agglutiner en bord de pilier (Figure IV.17 a).

IV.3.3.2 Propriétés physiques et mécaniques

IV.3.3.2.1 Propriétés physiques

La Figure IV.18 présente les différentes masses volumiques de la craie pure en fonction de sa profondeur dans le pilier et de son état hydrique (sec ou saturé). La Figure IV.19 présente les vitesses V_p des ondes P et la masse volumique des grains ρ_s de la craie pure.

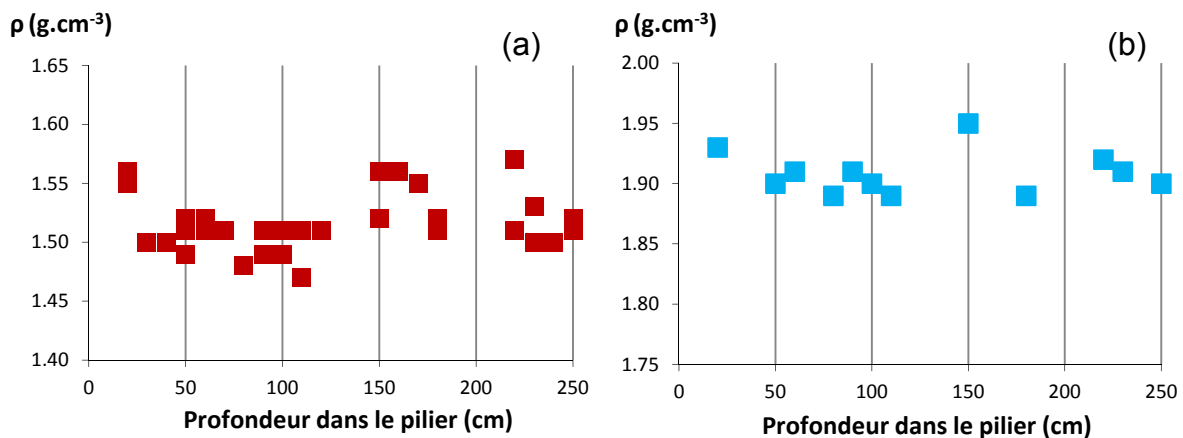


Figure IV.18 : Impact du vieillissement/endommagement sur les masses volumiques (a) sèche et (b) saturée en fonction de la profondeur. Craie de Château-Landon

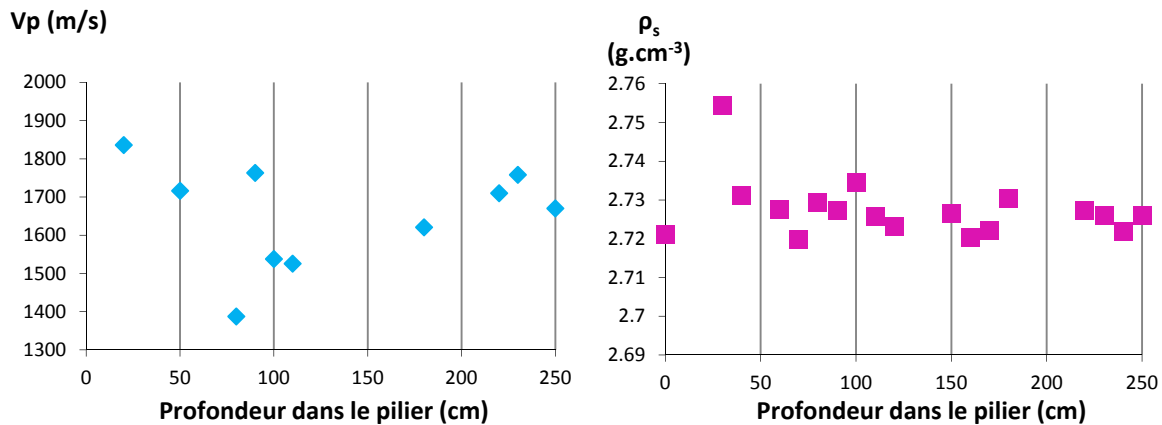


Figure IV.19 : Impact du vieillissement/endommagement sur la vitesse V_p des ondes de compression P et la masse volumique des grains ρ_s en fonction de la profondeur.
Craie de Château-Landon

Les résultats obtenus pour la craie de Château-Landon permettent de statuer l'impact du vieillissement/endommagement sur les propriétés physiques de la craie :

- les masses volumiques sèche et saturée ne semblent pas varier en fonction de la profondeur dans le pilier. Elles sont cohérentes avec l'absence de variation dans la texture des imageries MEB ;
- la vitesse des ondes P diminue globalement en fonction de la profondeur. La masse volumique des grains ne semble pas évoluer. La première semble être la seule des propriétés physiques à montrer une variation franche.

Les tendances observées au travers de ces résultats sont cohérentes les unes avec les autres. La non évolution des propriétés physiques (sauf pour les vitesses) de la craie de Château-Landon en fonction de la profondeur ne permet cependant pas de statuer clairement sur l'impact du vieillissement sur ses propriétés physiques.

IV.3.3.2.2 Propriétés mécaniques

La Figure IV.20 présente l'évolution des propriétés mécaniques sèches et saturées en fonction de la profondeur de la craie pure.

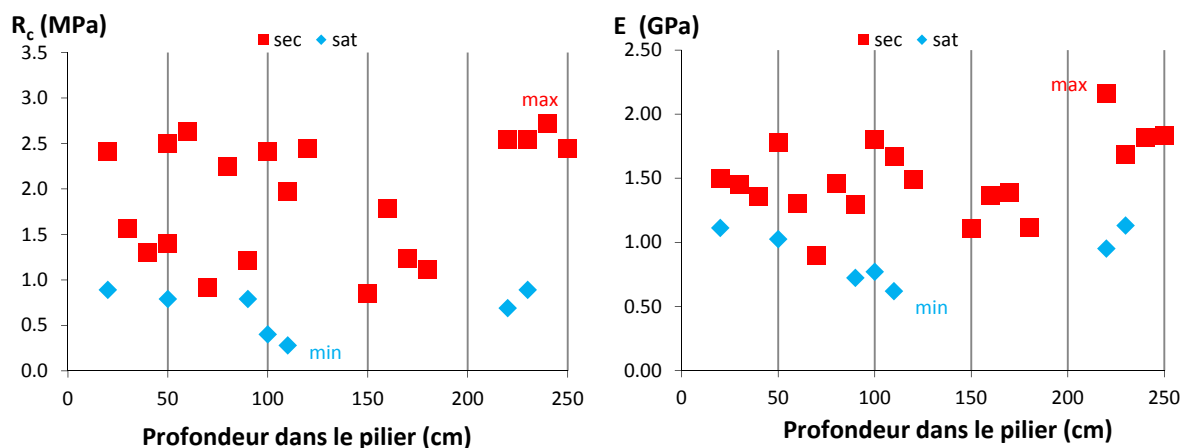


Figure IV.20 : Impact du vieillissement/endommagement sur les résistances en compression uniaxiale R_c et les modules de Young E en fonction de la profondeur.
Craie de Château-Landon

Les résultats obtenus pour la craie de Château-Landon permettent de statuer l'impact du vieillissement/endommagement sur les propriétés mécaniques de la craie pure :

- les résistances en compression uniaxiale et les modules de Young que ce soit dans l'état sec ou l'état saturé diminuent globalement en fonction de la profondeur (cœur exclu). Cependant cette tendance reste subjective et est à relativiser ;
- la dispersion des données est plus importante à l'état sec qu'à l'état saturé, bien que cette dispersion ne soit pas aussi forte que celle présente pour la craie dolomitique ;
- l'abaissement des valeurs de résistances et de modules de Young avec la saturation est cohérent avec ce qui avait été annoncé au Chapitre III.

Les tendances observées au travers de ces résultats sont cohérentes les unes avec les autres. La quasi non évolution des propriétés mécaniques de la craie de Château-Landon en fonction de la profondeur, ne permet cependant pas de statuer de manière formelle sur l'impact du vieillissement sur ses propriétés mécaniques et reste sujette à discussion.

IV.3.3.3 Étude de la fracturation

La méthode exposée en § IV.2.5 nous a permis de représenter la fréquence des fractures sous la forme d'une illustration présentée en Figure IV.21.

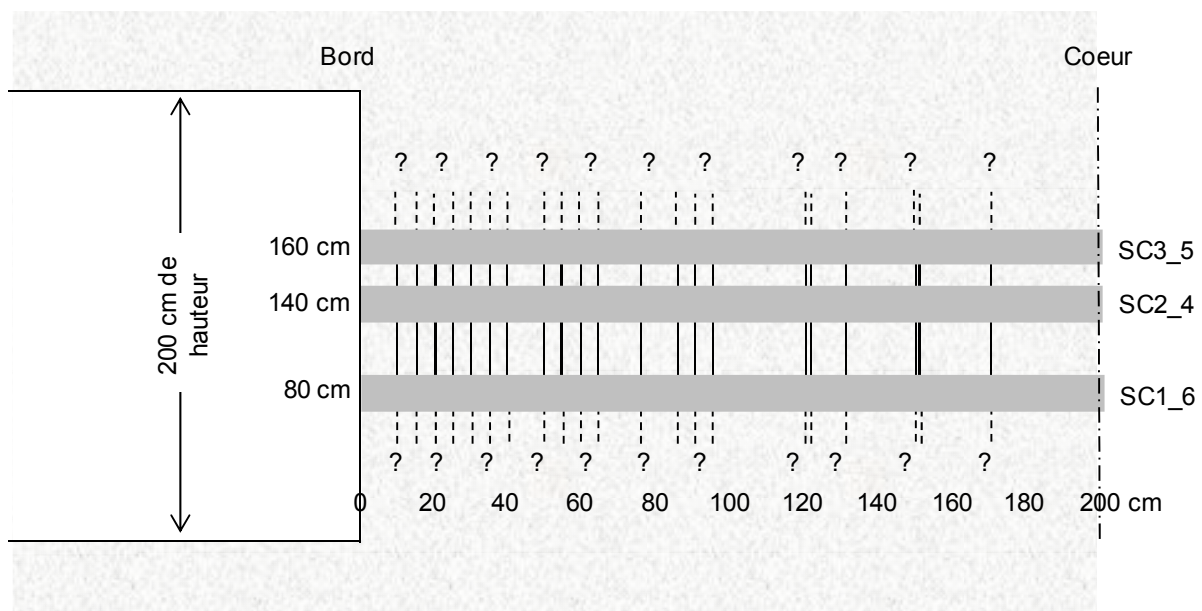


Figure IV.21 : Espacement des fractures verticales en fonction de la profondeur au sein du pilier de la carrière de Château-Landon

Cette configuration correspond à ce que l'on trouve habituellement dans les piliers de carrière (de craie ou d'autres matériaux). Elle présente cependant la tendance inverse de celle observée pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud.

IV.4. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Généralement, le vieillissement/endommagement se traduit par une détérioration des propriétés physiques et mécaniques de la partie du massif rocheux (état de fracturation, dissolution etc..) dite « à l'air libre ». Elle dépend de facteurs dits internes (Gökceoğlu et al. 2000, Jeannette 2000, Halsey et al. 1998, Ramana et Gogte 1982) comme la minéralogie (altérabilité, nature chimique...) et la pétrographie (structure, milieu poreux, taille des particules...) mais aussi de facteurs externes (Grgic et al. 2002, Gupta et Rao 2000, Oyama et Chigira 2000, Chigira et Oyama 2000, Chene et al. 1999) environnementaux (facteurs biologiques, climatiques...). Cette détérioration a tendance à se réduire dès lors que l'on s'enfonce de plus en plus dans le massif et s'exprime sous différentes formes selon le matériau considéré :

- dans le gypse (Sorgi et Auvray 2005, Auvray et al. 2004, Auvray 2003), elle se traduit par une frange de dissolution des cristaux et celle-ci est d'autant plus marquée en bord de pilier (augmentation de la porosité). Le gypse est également sensible aux processus mécaniques et hydriques ;
- dans le minerai de fer (Grgic et al. 2013, Dagallier et al. 2002, Grgic 2001), elle se traduit par des réactions chimiques d'oxydo-réduction entre les ions ferreux et ferriques changeant la structure même du matériau ;
- dans les monuments (Beck 2006), certaines pierres de taille présentent une « croûte » plus résistante, pour beaucoup d'autres c'est l'inverse ;
- dans les roches volcaniques et métamorphiques (charbon, gneiss, granite...), ce sont davantage les processus thermiques et mécaniques qui auront un impact sur leur vieillissement ;
- les roches sédimentaires en général sont davantage sensibles aux processus chimiques, hydriques, mécaniques et biologiques de par leur structure et leur minéralogie (Chene et al. 1999).

Pour les craies affleurantes, dans les carrières à ciel ouvert, la roche est soumise à plusieurs agents d'altération, à savoir le vent, l'eau (et sa chimie), les variations de la température, l'état de contrainte, ... Son vieillissement/endommagement se traduit sous la forme de fractures/fissures et de formes de dissolution (Chéné et al. 1999). Les résultats de la craie d'Estreux tendent à s'inscrire dans cette tendance puisqu'ils renvoient à plusieurs études traitant du sujet sur ce type de matériau (Sorgi et De Gennaro 2011, Nguyen 2009, Sorgi et De Gennaro 2006, Sorgi et Auvray 2005, Chene et al. 1999) : les variations cycliques de saturation et de désaturation du matériau tendent à créer de la fissuration (voire l'aggraver) et des cavités de dissolution. Ceci est principalement dû au fait que lors de ces cycles d'imbibition/séchage, la craie présente des variations de volumes (Nguyen 2009, Priol et al. 2007, Delage et al. 1996, Josa et al. 1987) qui ont d'ailleurs été observées lors de la phase préparatoire des essais de fluage (voir Chapitre V).

La tendance observée pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud, malgré une variation certaine dans les données due uniquement à l'échantillonnage, est contraire à ce que l'on trouve généralement dans les géomatériaux (excepté pour le béton qui voit ses propriétés s'améliorer au fil du temps). Il convient donc dans un premier temps de vérifier si un dépôt non homogène de la craie localisé ne pourrait pas être à l'origine de cette variation inattendue. Une variation latérale de faciès ne peut pas être envisagée ici car la tendance se retrouve de l'autre côté du pilier pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud et sur d'autres sondages situés à des hauteurs différentes dans le pilier. Il s'agit donc d'une configuration propre au pilier et non au dépôt non homogène des coccolithes.

De plus, les résultats obtenus pour les trois craies dans le cadre de cette étude sont compatibles avec les résultats obtenus au Chapitre III : il a été montré que la résistance de la craie saturée était plus faible que celle de la craie sèche (voir profils de teneur en eau). Néanmoins, la tendance observée pour la craie dolomitique ne permet pas une explication purement d'ordre mécanique. L'aspect mécanique ne donne qu'une part de réponse.

Les résultats obtenus pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud – ainsi que ceux de la craie phosphatée de Mons (voir Figure IV.22, Funcken et Welter 1996) – nous amènent à proposer plusieurs phénomènes et mécanismes communs aux carbonates et pouvant expliquer – au moins en partie – les différences observées sur les propriétés physiques et mécaniques de la craie entre le bord et le cœur de pilier.

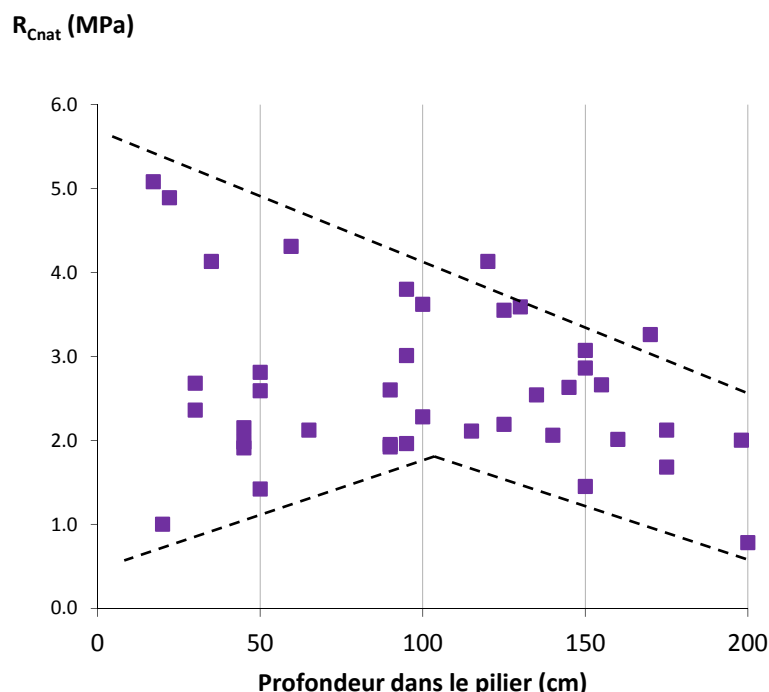


Figure IV.22 : Évolution de la résistance en compression uniaxiale en fonction de la profondeur dans un pilier de la carrière de Mons en Belgique (Funcken et Welter 1996)

IV.4.1. Néomorphisme d'aggradation ou Ostwald Ripening (Ostwald 1897)

Considérant la craie dolomitique, les « gros » cristaux en bord sont des rhomboèdres parfaits bien différents des plaquettes de coccolithes rencontrés habituellement dans la craie. Aucune trace de dissolution n'a été trouvée sur ces cristaux même si quelques uns peuvent être observés sur les plus « petits » cristaux rencontrés en bord. Le fait que les « petits » cristaux présentent des traces de dissolution mais pas les « gros » suggère que ces derniers sont plus stables que les premiers et plus résistants à la dissolution.

Cette discrimination par rapport à la taille des cristaux rappelle le phénomène de néomorphisme d'aggradation ou mûrissement d'Ostwald (Ostwald 1897) dirigé par les différences d'énergie de surface (Ratke et Voorhees 2002, Dehoff 1991, Morse et Casey 1988, Voorhees et Glicksman 1984, Lifshitz et Slyozov 1961, Wagner 1961). Il s'agit d'un processus spontané qui consiste en l'évolution dans le temps de très petites particules solides dans une solution en général légèrement sursaturée, les grains étant de même nature chimique mais de tailles différentes. Le moteur de ce mûrissement se trouve dans la dépendance de la solubilité d'un cristal à l'égard de sa taille et s'exprime par la relation de Gibbs-Kelvin. Selon cette loi, la solubilité d'un cristal diminue dès lors que sa taille augmente. L'énergie libre de surface d'un cristal dépend entièrement de la forme et de la taille de celui-ci (en particulier le rapport volume/surface). Pour qu'un cristal puisse pousser, il faut que celui-ci ait atteint une taille critique. Dans les carbonates et en termes de précipitation – en particulier pour la calcite ici – la taille et la forme des cristaux dépendent de la cinétique du milieu dans lequel ils évoluent. Il y a compétition entre la force motrice (formation de la phase stable) et l'énergie de surface. Lors de la germination, plus le milieu est sursaturé plus le nombre de nuclei va augmenter et donc plus le nombre de cristaux sera important.

Cependant, ceci implique que leur taille ne sera pas très importante. Dans un contexte de paragenèse, les « petits » cristaux sont moins stables thermodynamiquement que leurs homologues plus imposants : les premiers se dissolvent ou s'agglutinent pour nourrir les plus « gros » et ces derniers prennent une de leur forme régulière stable – rhomboèdre pour la calcite lors de leur pousse et sont plus résistants. La sursaturation même légère est toujours préférée à la sous-saturation pour des raisons énergétiques. Lorsque l'eau atteint un état d'équilibre avec le milieu environnant les deux réactions opposées dissolution et recristallisation sont en équilibre constant.

Or, la carrière de Saint-Martin-le-Nœud se trouve directement dans la zone de battement de nappe (ou zone non saturée) (Barhoum 2014) et il s'avère que les eaux en provenance des lacs aux abords du pilier sont en équilibre chimique avec la calcite, et le pH est aux alentours de 7.30. Les bords des piliers de craie sont donc soumis à des cycles d'imbibition/séchage assez fréquents plus ou moins synchrones avec le battement de nappe (Gombert 2014). En raison des cycles, le milieu en bord

de pilier est régulièrement sursaturé : le temps de résidence du fluide est court et celui-ci, initialement chargé en ions calcium et hydrogénocarbonate, en passant de l'état liquide à l'état vapeur (à cause d'un changement d'hygrométrie par exemple) sursature le milieu. L'eau chargée en d'autres ions (voir plus loin) en contact avec les piliers doit favoriser le changement de surface de charge (Abdallah et Gmira 2013) des cristaux et faciliter le phénomène de néomorphisme en jouant un rôle sur la cinétique de cristallisation. Mais pour qu'il y ait échange de matière entre le solide et la solution, les sites de liaison doivent être dégagés.

IV.4.2. Évolution dans un milieu oxydant prédisposant à une recristallisation

Parmi les minéraux accessoires de la craie, la silice comme l'argile (Meyer 1984, Baker et al. 1980) a tendance à freiner la dissolution/recristallisation de la calcite qui elle, trouve son équilibre pour un pH aux alentours de 8. Chez les coccolithophoridées actuelles telles que *Emiliana huxleyi*, les biopolymers/polysaccharides – même en quantité peu importante – produits par les êtres vivants inhibent de manière significative la recristallisation de la calcite (Henriksen et al. 2004, Marsh 2003, Marsh et al. 2002). Ces matières organiques constituent le moyen qu'ont les coccolithophoridés de palier aux dissolutions/recristallisations intempestives et garder ainsi leur forme sphérique. Ces matières organiques se transforment généralement en argile lors de la diagenèse et sont présentes sous forme de feuillets très fins sur les plaquettes de coccolithes (Okhrimenko et al. 2014, Skovbjerg et al. 2012). Il est communément supposé dans la littérature que ces particules organiques bloquent/encombrent les sites de pousse des cristaux empêchant les ions en solution de se lier à la surface du cristal mais augmentent les propriétés d'adsorption d'eau de la craie. Le fait même de la présence de cette matière organique rend le milieu plus réducteur.

Le pilier étudié dans la carrière de Saint-Martin-le-Nœud semble évoluer en milieu oxydant : le pH est stable aux alentours de 7.30 (et ne varie pas au cours de l'année - Barhoum 2014) et l'eau est saturée en oxygène de manière cyclique selon la période de l'année au même titre que les ions hydrogénocarbonate. Or, des conditions oxydantes suffisantes sur la craie ont pour effets de faire partir la matière organique, dégager les sites de pousse et favoriser une recristallisation lorsque toute la matière est partie et que le milieu est riche en ions calcium et hydrogénocarbonate (Belova et al. 2012, Robinson et Woodun 2008). Les propriétés oxydantes, la sursaturation cycliques (via les battements de nappe) et la chimie particulière de l'eau représentent donc des conditions favorables à la recristallisation de la calcite en bord de pilier. Ces conditions semblent absentes du cœur de pilier continuellement saturé (voir point suivant). La craie de Château-Landon se retrouve plus ou moins dans les mêmes conditions.

La craie d'Estreux, quant à elle, présente des traces de dissolution mais pas de recristallisation (selon les photos MEB). L'eau de la nappe de la craie est certes d'un pH inférieur à celui nécessaire à l'équilibre de la calcite, donc potentiellement oxydante, mais la craie présente une part non négligeable de glauconie (minéral vert ferreux d'altération formé dans des conditions réductrices lors de la diagenèse) comme agent réducteur. Si le potentiel réducteur est supérieur au potentiel oxydant, ce qui semble être le cas ici, le milieu restera en milieu réducteur et la matière argileuse gardera son rôle d'inhibiteur de recristallisation et aura un effet tampon sur les propriétés oxydantes de l'eau. Cependant avec un pH inférieur au pH d'équilibre de la calcite, l'équilibre calco-carbonique se déplace et les traces de dissolution peuvent commencer à apparaître (Chou et al. 1989).

IV.4.3. Drainage vertical du pilier

Barhoum 2014 a montré que dans la zone d'étude de la carrière de Saint-Martin-le-Noëud, la circulation d'eau se fait verticalement de manière non négligeable. Le pilier se comporterait comme une stalactite géante (Gombert 2014). Les stalactites sont formées par cristallisation vers l'extérieur de carbonate de calcium lors du dégazage de dioxyde de carbone et forment un tube par lequel percole l'eau. Par conséquent, une cristallisation en bord serait plausible.

En plus de l'aspect chimique via la dissolution, l'eau possède un rôle d'érosion (aspect mécanique). Les eaux de percolation possèdent généralement une concentration en ions égale ou inférieure à celle des eaux du lac, et du fait de la saturation permanente du cœur de pilier, la sursaturation/oxydation du milieu n'a pas lieu. Le temps de résidence du fluide au sein du pilier serait bien plus important qu'en bord, la surface de charge des cristaux changerait en présence d'eau, la dissolution serait favorisée par rapport à la cristallisation mais également le transport de particules (érosion).

Cette hypothèse est d'autant plus plausible que la fracturation verticale est plus fréquente en cœur de pilier qu'en bord, ce qui implique que le passage des fluides y est bien plus facile qu'en bord de pilier où la fracturation est moindre.

IV.5. CONCLUSION

L'évolution des propriétés physiques et mécaniques des craies de trois carrières souterraines a été montrée à l'aide de mesures des propriétés physiques et des essais de compression uniaxiale sur échantillons secs et saturés avec pour seule variable la profondeur de l'échantillon dans le pilier.

Selon toute vraisemblance, la craie en provenance des carrières souterraines vieillit en présence d'eau. Son vieillissement se traduit de différentes façons et dépend de la nature de la craie et du milieu dans lequel elle évolue :

- si la craie comporte une part non négligeable de matériaux argileux ou évolue dans un milieu réducteur, ses propriétés se détériorent du cœur en bord de pilier. Cette configuration est classiquement retrouvée chez les autres géomatériaux naturels (gypse, minerai de fer, ...). On retrouve typiquement des traces de dissolution dans la craie, ce qui est un signe d'altération par l'eau ;
- si la craie évolue plutôt dans un milieu oxydant (oxygène, phosphates, ...), ses propriétés s'améliorent du cœur au bord de pilier. Si la circulation d'eau est importante et selon sa nature chimique : (a) Celle-ci accentue l'écart observé entre bord et cœur de pilier lorsqu'il y a alternance de phases de drainage vertical (imbibition et séchage, fractures en cœur, transport simplifié en cœur, passage difficile en bord de pilier, érosion, ...) ; (b) Elle peut augmenter la cinétique et déplacer l'équilibre des réactions chimiques spontanées prenant place dans la craie (mûrissement d'Ostwald, dissolution-recristallisation, ...).

Les répercussions de ce vieillissement sur la stabilité des carrières souterraines peuvent être de nature positive. En effet, dans le cas d'une amélioration des propriétés physiques et mécaniques (pas d'agents réducteurs), les piliers de carrière gagnent en stabilité et la surface de charge ne diminue pas en fonction du temps. Le toit de la carrière reste maintenu. *A contrario*, si la craie évolue dans un milieu réducteur, le vieillissement de la craie devrait induire sur le long terme une désagrégation de la craie en bord de pilier, impliquant un amincissement du pilier supportant le toit de carrière et conduisant à un effondrement.

Certains de ces phénomènes pourraient s'appliquer avec une part différente selon la craie et les conditions environnementales dans laquelle elle évolue : on observe plus ou moins la même tendance pour les craies de Mons et de Saint-Martin-le-Nœud, mais les structures et le modèle hydrique des deux dernières présentent tout de même des différences. Ce qui amènerait l'hypothèse d'une combinaison des facteurs avec la part de chacun à déterminer au cas par cas.

Afin d'approfondir le sujet, une étude similaire sur des sondages verticaux dans des piliers devrait être en mesure d'apporter également des clarifications sur l'évolution verticale des propriétés de la roche, mais également traiter l'évolution d'autres facteurs intrinsèques à la craie et en particulier les courbes de rétention de la craie

entre le bord et le cœur de pilier. De même, des sondages horizontaux à même le massif – donc théoriquement traversant la partie « saine » – devrait pouvoir nous renseigner si les phénomènes observés dans les piliers s'appliquent ou non ailleurs dans la carrière.

Cependant, l'étude de stabilité ne serait pas complète sans une étude approfondie du comportement mécanique d'un pilier de carrière soumis aux effets du temps et de l'eau. La suite logique du raisonnement consiste naturellement à étudier le comportement visqueux de la craie dans des conditions similaires à celles rencontrées *in situ*. C'est ce que nous verrons au Chapitre V.

Chapitre V : Influence de l'hygrométrie sur le comportement à long terme des craies

Résumé :

Ce chapitre a pour but d'exposer la méthodologie et l'étude permettant d'apporter une connaissance plus précise du comportement différé des trois craies étudiées.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le comportement différé des craies au travers d'essais de fluage uniaxiaux, mais également d'analyser l'influence de l'eau et du déviateur sur ce comportement à long terme. Pour atteindre cet objectif, deux séries d'essais de fluage (par craie considérée), une à sec et l'autre à hygrométrie contrôlée sont mises en place sur une longue période. Elles permettent de montrer que ce comportement dépend d'une part de la microstructure-minéralogie de la craie mais également du couple déviateur-hygrométrie.

Nous avons également évalué, à partir d'un protocole expérimental approprié, l'effet d'un ennoyage brutal de la craie pouvant survenir lors d'une crue. Nous verrons que cet ennoyage provoque la rupture des échantillons et que le laps de temps entre ennoyage et rupture dépend entièrement de la craie considérée.

Les données in situ contribuent à aborder les questions relatives aux limites du champ d'expérimentation et à la fréquence d'occurrence des phénomènes environnementaux (remontée de la nappe, pluviométrie, etc...) ainsi qu'aux corrélations entre les différents phénomènes caractérisant l'interaction eau-roche.

Mots-clés : *craie, hygrométrie, comportement mécanique différé, déformations viscoplastiques, données in situ*

V.1. INTRODUCTION

L'étude de la stabilité de carrières souterraines sujettes aux battements de nappe nécessite une connaissance du comportement différé de la roche en présence d'eau. Ce comportement à long terme est intrinsèque à chaque matériau au même titre que son comportement à court terme (présenté au Chapitre III).

Il existe de nombreuses études portant sur le comportement différé de la craie. Citons Nguyen 2009, De Gennaro et al. 2005, Xie 2005, Priol 2005, Schroeder 2003, De Gennaro et al. 2003, Schroeder 2002, Maranini et Brignoli 1998, Maranini et Brignoli 1999 et Dahou et al. 1995.

Ces travaux ont montré la dépendance du comportement visqueux des craies à la vitesse de chargement mécanique avec ou sans variation de l'hygrométrie et/ou de la nature du fluide saturant. Ils ont montré par ailleurs que l'augmentation de la vitesse de chargement engendre une expansion de la limite élastique. Cependant ces approches ne permettent pas de représenter le comportement de la craie sous charge constante comme c'est le cas pour un pilier de carrière.

Les essais de fluage en laboratoire permettent d'étudier le comportement différé d'une roche en observant la réponse du matériau soumis à une charge constante en fonction du temps. La métrologie de ces essais permet le contrôle de divers paramètres comme l'hygrométrie, la contrainte ou la température.

Dans l'optique de pouvoir évaluer le comportement différé des craies et de se rapprocher des conditions *in situ*, des essais de fluage uniaxiaux de longue durée à sec et à hygrométrie contrôlée sont effectués sur les craies en provenance des carrières souterraines présentées au Chapitre II.

Afin de pouvoir évaluer également l'impact d'une crue sur la stabilité des carrières, ces essais se termineront obligatoirement par un ennoyage brutal de l'échantillon.

V.2. DISPOSITIFS ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

Il existe une multitude d'essais et de modes opératoires permettant d'étudier le comportement à long terme d'un matériau. Dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons qu'aux essais de fluage uniaxiaux. Ce test est conçu de manière à faire subir à un échantillon instrumenté divers paliers de contrainte et à enregistrer simultanément les déformations associées. Les dispositifs permettent d'effectuer des chargements mécaniques, hydriques et thermiques.

V.2.1. Préparation des échantillons

Les échantillons (diamètre 50 mm et élancement 2) sont façonnés selon la même méthode présentée au Chapitre III. Le suivi des déformations s'effectue, pour chaque échantillon de craie, à l'aide de jauges d'extensométrie axiales et latérales placées deux à deux au milieu de l'éprouvette. Le choix du type de jauges est établi en fonction de la durée approximative de l'essai souvent de l'ordre de plusieurs mois. La colle est la même que celle utilisée pour les essais mécaniques à court terme. Les jauges utilisées précédemment pour les essais à court terme (impédance de 250 Ω) deviennent instables dans le temps. Ainsi, des jauges d'une impédance supérieure (350 Ω), plus stables dans le temps, ont été utilisées. Ces jauges sont ensuite recouvertes de silicone de manière à les protéger des agressions extérieures telles que l'oxydation par exemple.

V.2.2. Essais de fluage uniaxiaux multipaliers

V.2.2.1. Série en condition sèche

Le but de cette série d'essais est d'étudier le comportement à long terme des craies sans couplage hydromécanique. Cette série est effectuée sur trois échantillons de craie d'Estreux et trois échantillons de craie de Saint-Martin-le-Nœud. Elle se déroule dans une salle climatisée, permettant le maintien de la température ambiante à une valeur constante (ici $20 \pm 1^\circ\text{C}$). Les conditions expérimentales sont résumées dans le Tableau V.1. Chaque échantillon instrumenté et préparé est placé dans un bâti de fluage permettant d'assurer le maintien de la contrainte appliquée sans l'utilisation d'une presse mais à l'aide d'un générateur de pression. Tous les six bâtis sont étanchéifiés. Ils sont alors reliés à une pompe hydraulique et protégés des courants d'airs par une cage de polystyrène. Les bâtis impairs (bâtis 1, 3 et 5) comportent les échantillons de craie de Saint-Martin-le-Nœud (dénommés SMb1, SMb3 et SMb5) et les bâtis pairs (bâtis 2, 4 et 6) comportent les échantillons de craie d'Estreux (dénommés EXb2, EXb4 et EXb6). L'essai est lancé avec le premier palier de contrainte qui est de 0.5 MPa. La vitesse de chargement est justifiée par rapport aux essais à court terme (cf. Chapitre III). Une fois que les vitesses instantanées¹⁸ tendent vers zéro et que la vitesse de fluage est stabilisée, on peut alors passer au palier suivant. Les différents paliers, à savoir 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.5, 9.0, 12.0 et 14.0 MPa se

¹⁸ Ces deux types de vitesse sont calculés à partir des mesures de déformation obtenues automatiquement à intervalle de temps régulier et court.

succéderont jusqu'à la rupture des différentes éprouvettes. La réalisation de ces essais de fluage par des paliers de contrainte croissants permet d'apprécier :

- le seuil d'enclenchement du fluage ;
- l'amplitude et les vitesses de déformations différées pour chaque palier ;
- le seuil d'accélération du fluage correspondant à la résistance à long terme.

Tableau V.1 : Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier. Série en condition « sèche ». Craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Noeud

* : les déformations ne sont pas assez importantes pour en tirer des conclusions ; (+) : rupture de l'éprouvette

	Échantillon	Hr (%)	Contrainte (MPa)	% Rc estimé (MPa)	Durée (j)	Instrumentation	Résultat
Saint-Martin-le-Noeud	SMb1	≈ 35	0.5	5	20	jauges 350 Ω EP34	Non exploitable*
		≈ 35	1	9	66		
		≈ 35	2	18	113		
		≈ 35	4	36	117		
		≈ 35	6.5	59	163		
		≈ 35	9	82	136		
		≈ 35	12	109	129		
		≈ 35	14	127	3(+)		
	SMb3	≈ 35	0.5	5	20	jauges 350 Ω EP34	Non exploitable*
		≈ 35	1	9	66		
		≈ 35	2	18	113		
		≈ 35	4	36	117		
		≈ 35	6.5	59	163		
		≈ 35	9	82	136(+)		
	SMb5	≈ 35	0.5	5	20	jauges 350 Ω EP34	Non exploitable*
		≈ 35	1	9	66		
		≈ 35	2	18	113		
		≈ 35	4	36	117		
≈ 35		6.5	59	163			
≈ 35		9	82	62(+)			
Estreux	EXb2	≈ 35	0.5	4	20	jauges 350 Ω EP34	Exploité
		≈ 35	1	8	66		
		≈ 35	2	15	113		
		≈ 35	4	31	117		
		≈ 35	6.5	50	163		
		≈ 35	9	69	70(+)		
	EXb4	≈ 35	0.5	4	20	jauges 350 Ω EP34	Exploité
		≈ 35	1	8	66		
		≈ 35	2	15	113		
		≈ 35	4	31	117		
		≈ 35	6.5	50	163		
		≈ 35	9	69	136(+)		
	EXb6	≈ 35	0.5	4	20	jauges 350 Ω EP34	Exploité
		≈ 35	1	8	66		
		≈ 35	2	15	113		
		≈ 35	4	31	117		
		≈ 35	6.5	50	163		
		≈ 35	9	69	136(+)		

Durée totale des essais sur la série : 747 j (2 ans et 17j)

V.2.2.2. Série à hygrométrie contrôlée

Le but de cette série est d'étudier le comportement à long terme des craies avec un couplage hydromécanique.

La principale difficulté dans la réalisation de ce type d'essai vient du choix des chemins de sollicitation. Contrairement aux essais en condition sèche où la contrainte ne constituait que l'unique variable, il faut ajouter l'hygrométrie comme variable supplémentaire. Le choix du chemin de sollicitation, donc le couple (σ, Hr) , est crucial. En effet, si la sollicitation hydrique précède une sollicitation mécanique, la réponse du matériau sera différente lorsque les étapes sont inversées. Le principal problème rencontré est que l'historique de chargement *in situ* tant sur le plan hydrique que mécanique n'est pas connu avec exactitude. Notre but final étant de caractériser le comportement à long terme des craies, et plus particulièrement le comportement en cas de crue, le dernier chargement devra obligatoirement consister en une simulation de crue, donc un ennoyage brutal.

Cet essai est réalisé sur trois échantillons de craie d'Estreux et trois échantillons de craie de Saint-Martin-le-Nœud. Chacun des échantillons est placé à une hygrométrie qu'on peut retrouver *in situ*, à savoir 85 %, 90 % et 98 %. L'essai se déroule dans une salle climatisée, permettant le maintien de la température ambiante à une valeur constante de 20°C. Cette série nécessite la préparation des mêmes solutions salines que dans le Chapitre III suivant la norme NF X 15-119. Chaque échantillon instrumenté et préparé est placé dans un bâti de fluage permettant d'assurer le maintien de la contrainte appliquée sans l'utilisation d'une presse mais à l'aide d'un générateur de pression. Tous les bâtis sont étanchéifiés et placés au-dessus de bacs contenant les solutions salines dimensionnés selon la norme NF EN ISO 483 (voir Figure V.1). Des ventilateurs situés dans l'embase du bâti permettent une répartition homogène de la vapeur d'eau. Les bâtis dont l'échantillon est soumis à la même hygrométrie (par exemple 85 %) sont reliés au même générateur de pression.

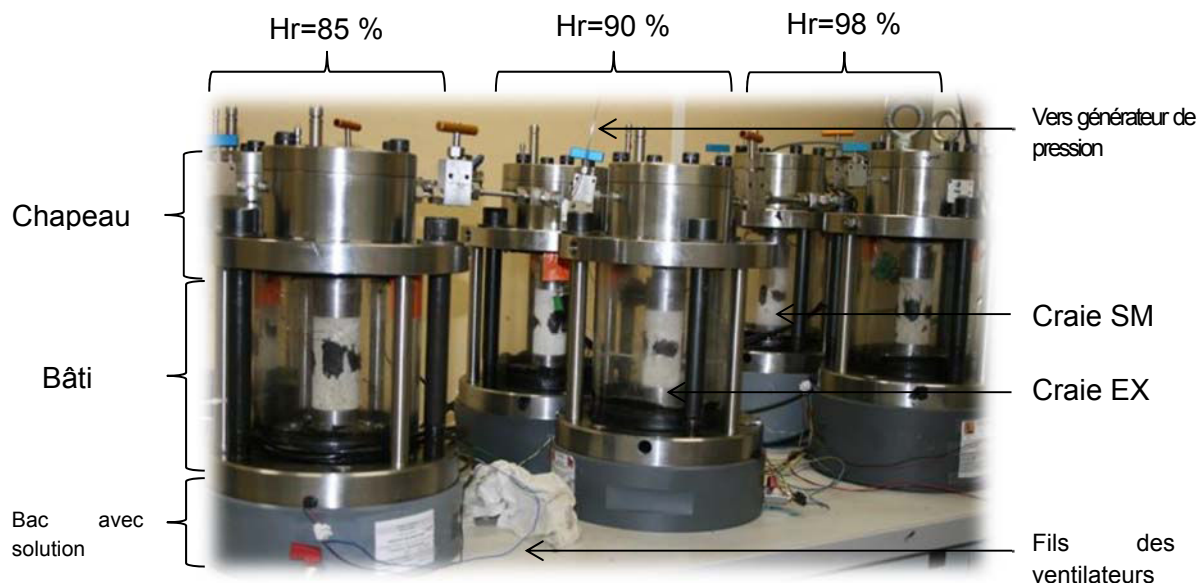


Figure V.1 : Dispositif expérimental de la série à hygrométrie contrôlée

Pour des soucis de dénomination, chaque échantillon se verra attribuer le symbole de la craie correspondante suivi de l'hygrométrie de départ (ex : SM85%). Les conditions expérimentales sont résumées dans le Tableau V.2.

Tableau V.2 : Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier. Série à hygrométrie contrôlée. Craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud

* : les déformations ne sont pas assez importantes pour en tirer des conclusions ; (+) : rupture de l'éprouvette

	Échantillon	Hr (%)	Contrainte (MPa)	% Rc estimé	Durée (j)	Instrumentation	Résultat
Saint-Martin-le-Nœud	SM85%	85	0	0	45	jauges 350 Ω EP34	Non exploitable*
		85	0.5	5	70		
		85	1	9	22		
		85	2	18	101		
		85	3.5	32	151(+)		
	SM90%	90	0	0	45	jauges 350 Ω EP34	Exploité
		90	0.5	5	70		
		90	1	9	22		
		90	2	18	101		
		90	3.5	32	331		
		98	3.5	32	159		
	SM98%	Saturation	3.5	32	1(+)		
		98	0	0	45	jauges 350 Ω EP34	Exploité
		98	0.5	5	70		
		98	1	9	22		
98		2	18	101			
98		3.5	32	326			
Saturation	3.5	32	5(+)				
Estreux	EX85%	85	0	0	45	jauges 350 Ω EP34	Exploité
		85	0.5	4	70		
		85	1	8	22		
		85	2	15	101		
		85	3.5	27	281		
		98	3.5	27	157		
	EX90%	saturation	3.5	27	82(+)		
		90	0	0	45	jauges 350 Ω EP34	Exploité
		90	0.5	4	70		
		90	1	8	22		
		90	2	15	101		
		90	3.5	27	332		
	98	3.5	27	159			
	EX98%	saturation	3.5	27	109		
		98	0	0	45	jauges 350 Ω EP34	Exploité
98		0.5	4	70			
98		1	8	22			
98		2	15	101			
98		3.5	27	326			
saturation	3.5	27	108(+)				

Durée totale de l'essai sur la série : 838 j (2 ans et 108 j)

Une fois l'équilibre hydrique établi, l'essai est lancé avec le premier palier de contrainte qui est de 0.5 MPa. Lorsque les vitesses instantanées tendent vers zéro et que la vitesse de fluage est stabilisée, on peut passer au palier suivant. Les différents paliers (à savoir 0.5, 1.0 et 2.0 MPa) se succéderont de cette façon jusqu'à un dernier palier de 3.5 MPa, correspondant à la contrainte maximale qui s'exercerait sur les piliers *in situ* estimée par la méthode d'aire tributaire.

Dès lors que ce dernier palier de chargement mécanique est atteint et que la vitesse de fluage est stabilisée, les échantillons subissent différents chargements hydriques suivant leur hygrométrie de départ. Les échantillons initialement placés à une hygrométrie de 85 % et 90 % sont placés à une hygrométrie de 98 % en changeant les solutions salines dans les bacs. Ceux placés initialement à une hygrométrie de 98 % sont envoyés avec de l'eau équilibrée thermiquement et chimiquement¹⁹. Les autres échantillons subiront le même sort une fois arrivés à l'équilibre.

La réalisation de ces essais de fluage par des paliers de contrainte axiale croissants permet d'apprécier :

- le seuil d'enclenchement du fluage pour chaque hygrométrie de départ ;
- l'amplitude et les vitesses de déformations différées pour chaque palier hydrique comme mécanique ;
- le seuil d'accélération du fluage correspondant à la résistance à long terme.

V.2.2.3. Cas particulier de la craie « pure »

La craie de Château-Landon est une craie particulière dont l'instrumentation est assez difficile. Sa sensibilité à l'eau et sa grande déformabilité sous chargement mécanique, constatées lors des essais mécaniques à court terme dans le Chapitre III, ont conduit à mettre en œuvre une métrologie particulière.

Les échantillons de craie de Château-Landon (diamètre 50 mm élancement 2) sont carottés à l'air puis passés brièvement à l'air comprimé de manière à les débarrasser de poussières éventuelles. Quatre échantillons sur les six suivront le même protocole que pour les échantillons des deux autres craies (cf. § V.2.1).

Les deux derniers comporteront simultanément deux systèmes de mesure de déformation : des jauges d'extensométrie, plus courtes mais de même impédance que les autres, et des colliers LVDT (Linear Variable Differential Transformers). Ce choix de double système de mesure est fait en raison de la grande déformabilité de cette craie et de la difficulté du système jauges/colle à adhérer à la craie lorsque celle-ci se déforme trop. Les colliers LVDT comportent 4 vérins reliés à la centrale d'acquisition et 4 points d'ancrage, répartis en alternance sur la couronne. La principale difficulté réside dans le placement des colliers LVDT par rapport au placement des jauges pour éviter tout poinçonnement. Les colliers LVDT et les jauges, ainsi que leurs axes

¹⁹ Malheureusement, il n'est pas possible de savoir si l'équilibre chimique est assuré *in situ* lors d'une remontée de nappe. La première approche reste d'étudier l'impact de l'eau d'un point de vue hydrique et mécanique.

respectifs, sont donc placés sur les échantillons comme le montre la Figure V.2. Les colliers, comportant les vérins latéraux, sont accompagnés par des vérins verticaux.

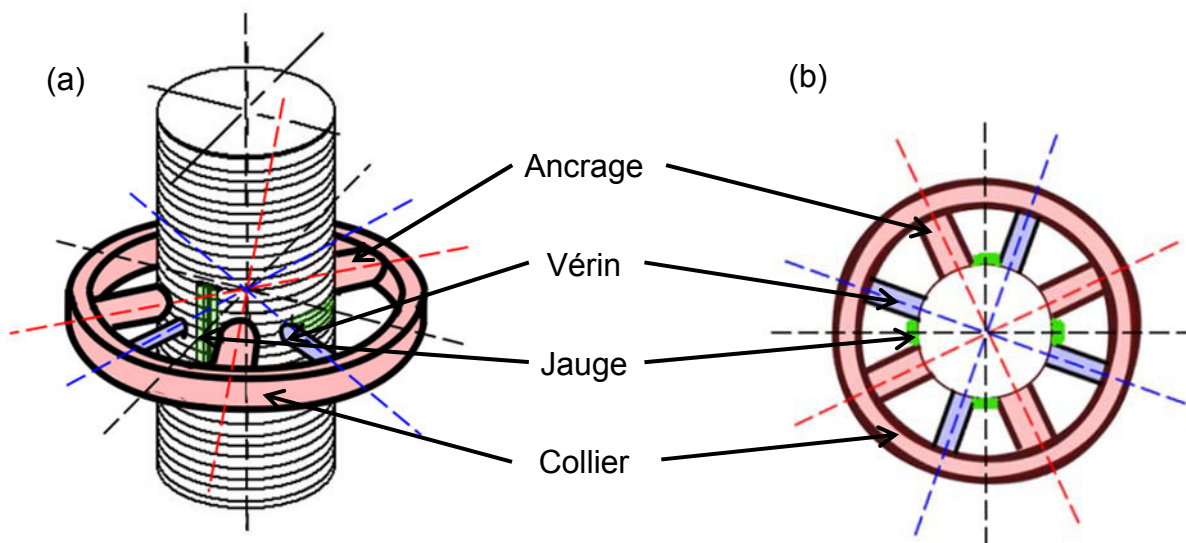


Figure V.2 : Schéma de disposition des jauges et colliers LVDT sur les échantillons de la craie de Château-Landon destinés aux essais de fluage en compression simple
(a) vue de côté (b) vue du dessus

Les colliers LVDT ont été à plusieurs reprises utilisés pour l'étude du comportement des craies (Nguyen 2009, Priol 2005) même si la méthode des jauges reste la plus utilisée (Wassermann 2006, Xie 2005, Mata 2001, Homand 2000, Dahou et al. 1995, Gourri 1991, Djebbi 1984, ...).

Trois des six échantillons sont destinés à des essais de fluage en conditions sèches et les autres en conditions partiellement saturées. Pour les conditions partiellement saturées, les trois hygrométries utilisées pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud ont été reprises (85 %, 90 % et 98 %). Chaque série comporte un échantillon instrumenté avec un collier LVDT. Dans le cas de la série à hygrométrie contrôlée, il s'agit de l'échantillon placé à une hygrométrie de 98 %.

Cette série particulière nécessite l'utilisation de deux générateurs de pression, un pour la série à hygrométrie contrôlée et un pour la série en conditions sèches. Ces essais se font dans la même salle que la série sèche des craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud et nécessite la protection d'une cage de polystyrène contre les courants d'airs.

Pour la dénomination, les échantillons de la série sèche et de la série à hygrométrie contrôlée sont placés respectivement dans les bâtis pairs et impairs (bâti 1 à Hr=85 % ; bâti 3 à Hr=90 % ; bâti 5 à Hr=98 %). Les échantillons se voient attribuer le symbole de la craie suivie de son numéro de bâti et de la lettre F (ex : CH4-F pour l'échantillon situé dans le bâti 4).

Suivant les conditions hydriques, le mode opératoire et les différents paliers de contrainte appliqués sont les mêmes que pour les séries d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud. Les conditions expérimentales sont résumées dans le Tableau V.3.

Tableau V.3 : Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier. Craie de Château-Landon

* : les déformations ne sont pas assez importantes pour en tirer des conclusions ; (+) : rupture de l'éprouvette ;
(%) : décollement des jauges

Échantillon	Hr (%)	Contrainte (MPa)	% Rc estimé	Durée (j)	Instrumentation	Résultat
CH1-F	85	0	0	137	jauges 350 Ω EP34	Exploité
	85	0.5	11	96		
	85	1	22	90(%)		
CH2-F	≈ 35	0.5	11	125	jauges 350 Ω EP34	Non exploitable*
	≈ 35	1	22	90		
	≈ 35	2	44	3(+)		
CH3-F	90	0	0	137	jauges 350 Ω EP34	Non exploitable*
	90	0.5	11	96		
	90	1	22	(%)		
CH4-F	≈ 35	0.5	11	125	jauges 350 Ω EP34	Non exploitable*
	≈ 35	1	22	90		
	≈ 35	2	44	1(+)		
CH5-F	98	0	0	137	jauges 350 Ω EP34 + capteurs LVDT	Non exploitable*
	98	0.5	11	96		
	98	1	22	37(%)		
CH6-F	≈ 35	0.5	11	125	jauges 350 Ω EP34 + capteurs LVDT	Non exploitable*
	≈ 35	1	22	90		
	≈ 35	2	44	66(+)		

Durée totale de l'essai sur la série : 323 j

V.3. RÉSULTATS

Les courbes de fluage complètes (déformations instantanées et différées) sont situées en Annexe C. Les courbes de déformations différées correspondant à chaque échantillon et les tableaux de modules (et les vitesses de fluage) correspondant à chaque changement de palier sont également placés en Annexe C.

V.3.1. Craie dolomitique de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud

V.3.1.1. Série en condition sèche

Les résultats d'essais d'un des échantillons secs de la craie de Saint-Martin-le-Nœud présentent les déformations différées en fonction du temps avec indication du palier de contrainte appliquée.

La Figure V.3 présente les déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées (partie supérieure) et les déformations déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ et volumiques ε_v^{vp} , dont les valeurs négatives traduisent une dilatance de l'échantillon, différées (partie inférieure).

Le Tableau V.4 présente les moyennes des modules calculés à partir des courbes des déformations instantanées et la Figure V.4 les échantillons après leur rupture. Les échantillons de la craie de Saint-Martin-le-Nœud ont des comportements différés similaires, d'où le choix de ne représenter qu'un seul d'entre eux.

Cependant les résultats correspondant aux déformations différées ne peuvent être exploités en raison du peu de déformation différée des échantillons (250 $\mu\text{m}/\text{m}$ en valeur absolue) et ce même au bout de deux ans d'expérimentation et avec des contraintes de 9, 12 et 14 MPa, comme en témoigne la Figure V.3. La majorité de la déformation totale, somme des déformations instantanées et différées, des échantillons de craie de Saint-Martin-le-Nœud se produit lors de la phase de chargement mécanique. À titre indicatif, pour l'essai présenté par la Figure V.3, les rapports de déformations instantanées $\varepsilon_{ax}^{inst} / \varepsilon_{lat}^{inst}$ valent respectivement 9,10, 8, 7, 6, 6, 3 et 3 aux paliers de 0.5, 1, 2, 4, 6.5, 9, 12 et 14 MPa. Il en résulte, que le mécanisme de fluage n'est pas prépondérant pour cette craie dans la gamme des contraintes attendues par rapport à la réponse instantanée.

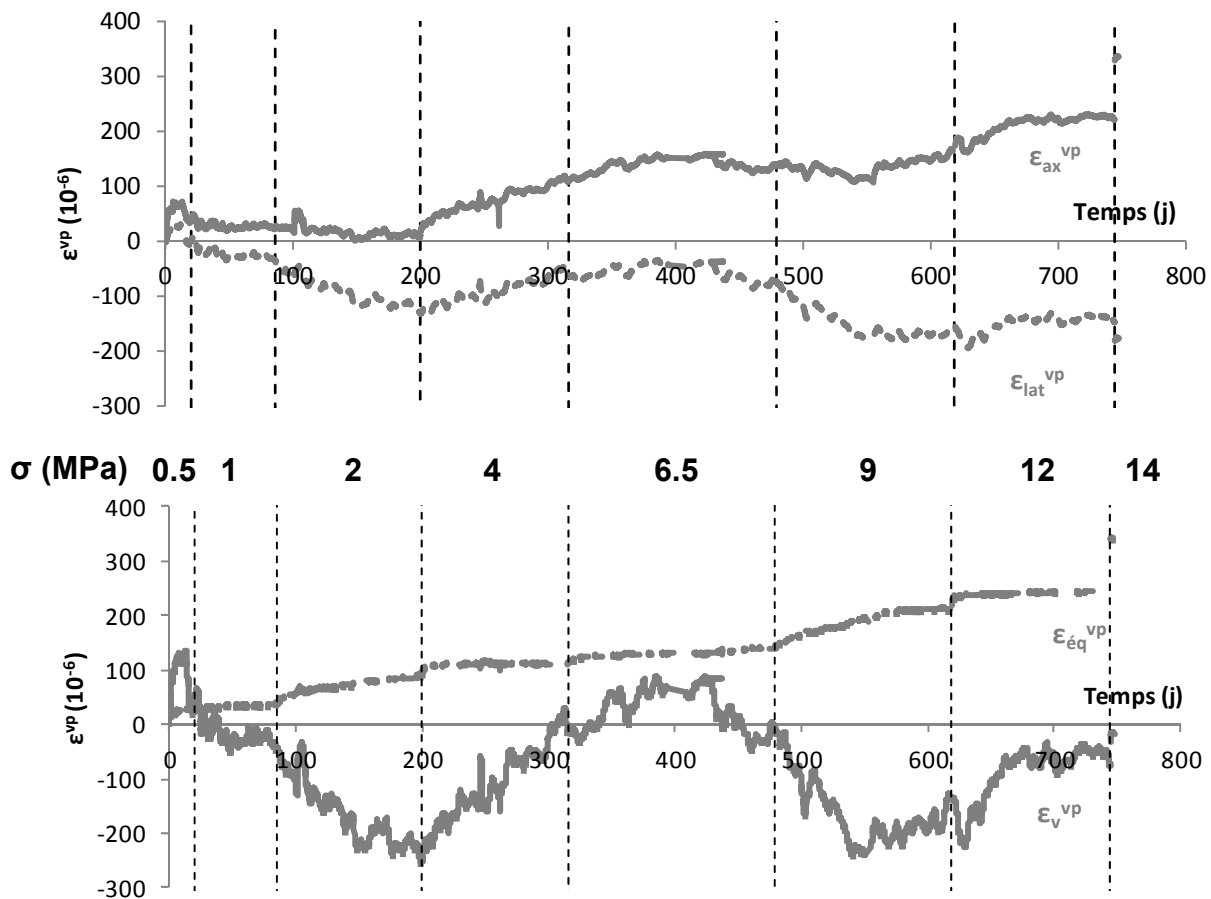


Figure V.3 : Courbes de fluage d'un échantillon sec (SMB1) de craie prélevé dans la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Déformations différées axiales ε_{ax}^{vp} , latérales ε_{lat}^{vp} , volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{éq}^{vp}$

Toutefois la rupture a lieu soit de manière brutale (bâti 1) soit après une phase de fluage tertiaire (III) (bâti 5) soit au changement de palier (9 MPa, bâti 3). De plus, en faisant abstraction des faibles déformations, les échantillons présentent de la dilatance différée pour les faibles paliers de contrainte (inférieur ou égal à 2 MPa), puis une contractance différée pour un palier de contrainte modéré (entre 4 et 6.5 MPa), et de nouveau une dilatance différée ou une déformation à volume constant pour des paliers de contrainte supérieure à 6.5 MPa. Néanmoins, il pourrait très bien s'agir d'un artefact puisque la courbe de déformations volumiques semble observer cette variation tous les 365j environ. Plusieurs modules ont été mesurés et calculés à partir des courbes contrainte-déformation des phases de chargement mécanique. Le comportement différé est similaire pour les trois échantillons, cependant la réponse instantanée est différente d'un échantillon à l'autre.

Tableau V.4 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série en conditions sèches. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

	SMb1 (LT)	SMb3 (LT)	SMb5 (LT)	SM1 (CT sec)
ρ_d (g.cm ⁻³)	1.78	1.69	1.79	1.63
E (GPa)	12.66±4.04	15.76±2.45	10.85±0.52	10.03±0.38
ν	0.22±0.09	0.31±0.05	0.23±0.01	0.17±0.01
Résistance LT (MPa)	14 (130% σ_c)	9.0 (80% σ_c)	9.0 (80% σ_c)	10.9

On peut cependant remarquer que les valeurs de modules sont similaires (toute variabilité prise en compte) à ceux calculés sur les essais à court terme, comme en témoigne le Tableau V.4. Les échantillons présentent une forme de rupture soit en sablier soit sous la forme de colonnes.



Figure V.4 : Photographie des échantillons de fluage après essai montrant la forme des ruptures. Série en condition sèche. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

La supériorité de la résistance à long terme par rapport à la résistance à court terme dans le cas de l'échantillon SMb1 peut signifier plusieurs choses. La résistance à long terme correspond au seuil d'accélération du fluage. Cependant sur la plupart des géomatériaux endommageables, ce seuil d'accélération est compris entre 50 et 70 % de leur résistance à court terme. Or les modules mesurés pour SMb1 présentent un écart-type assez conséquent avec une augmentation des modules axiaux et une diminution des modules latéraux avec le chargement. Soit le matériau s'est endommagé en cours d'essai (particulièrement au palier de 9 MPa compte tenu des déformations viscoplastiques latérales et les photographies après essai), soit cela est uniquement dû à l'échantillonnage, soit cela résulte simplement de la variabilité naturelle.

V.3.1.2. Série à hygrométrie contrôlée

V.3.1.2.1. Modules de déformation instantanés et résistances à long terme

Le Tableau V.5 présente les modules moyens calculés à partir des courbes de déformations instantanées pour les trois échantillons de craie. Il y est ajouté, en guise de comparaison, un des essais de compression à court terme (compression uniaxiale en condition saturée). Le détail pour chaque échantillon (avec les vitesses de fluage pour chaque palier, hydrique comme mécanique) est placé en Annexe C.

Tableau V.5 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculées à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

	SM85%(LT)	SM90%(LT)	SM98%(LT)	SM5(CT sat)
ρ_d (g.cm ⁻³)	1.66	1.68	1.61	1.68
Hr initiale (%)	85	90	98	-
E (GPa)	11.70±0.57	11.10±2.00	8.73±0.64	11.33±0.49
ν	0.21±0.01	0.26±0.06	0.26±0.03	0.18±0.01
Résistance LT (MPa)	-	3.5	3.5	7.8
après ennoyage	-	(45% σ_c)	(45% σ_c)	-

Les trois échantillons de craie soumis aux essais de fluage en conditions partiellement saturées ont des masses volumiques situées dans le même ordre de grandeur (en tenant compte bien entendu des inévitables hétérogénéités du matériau). Les effets dus au fluage prennent donc le pas sur le comportement instantané. La résistance à long terme de la craie dolomitique représente en moyenne 45 % de sa résistance à court terme à l'état saturé.

V.3.1.2.2. Déformations de fluage

Les résultats d'essais sur échantillons à hygrométrie contrôlée de la craie de Saint-Martin-le-Nœud présentent les déformations différées en fonction du temps avec indication du palier de contrainte appliquée. La Figure V.5 montre les déformations différées axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} , la Figure V.6 les déformations volumiques ε_v^{vp}

et déviatoriques $\varepsilon_{\dot{e}q}^{vp}$. Ces déformations sont toutes exprimées en fonction du temps. La Figure V.7 présente les déformations volumiques ε_v^{vp} en fonction des déformations déviatoriques $\varepsilon_{\dot{e}q}^{vp}$ (ou distorsion) différées. Les domaines de contractance et de dilatance correspondent aux domaines positif et négatif respectivement de la déformation volumique. Le Tableau V.6 donne les vitesses moyennes de déformation différée pour chaque palier. Elles sont calculées à partir de la pente de la droite de régression déformation-temps lors de la phase de fluage stationnaire ou secondaire (II).

Chaque hygrométrie de départ est symbolisée par une couleur : rouge pour Hr=85 %, orange pour Hr=90 % et bleu pour Hr=98 %. Les diagrammes sont séparés en zones (entre pointillés) correspondant au palier de contrainte (vert) et/ou le palier hydrique (violet) appliqués. Les courbes s'arrêtent à la rupture de l'échantillon correspondant et un zoom a été effectué sur le début des essais (voir encadré sur la figure).

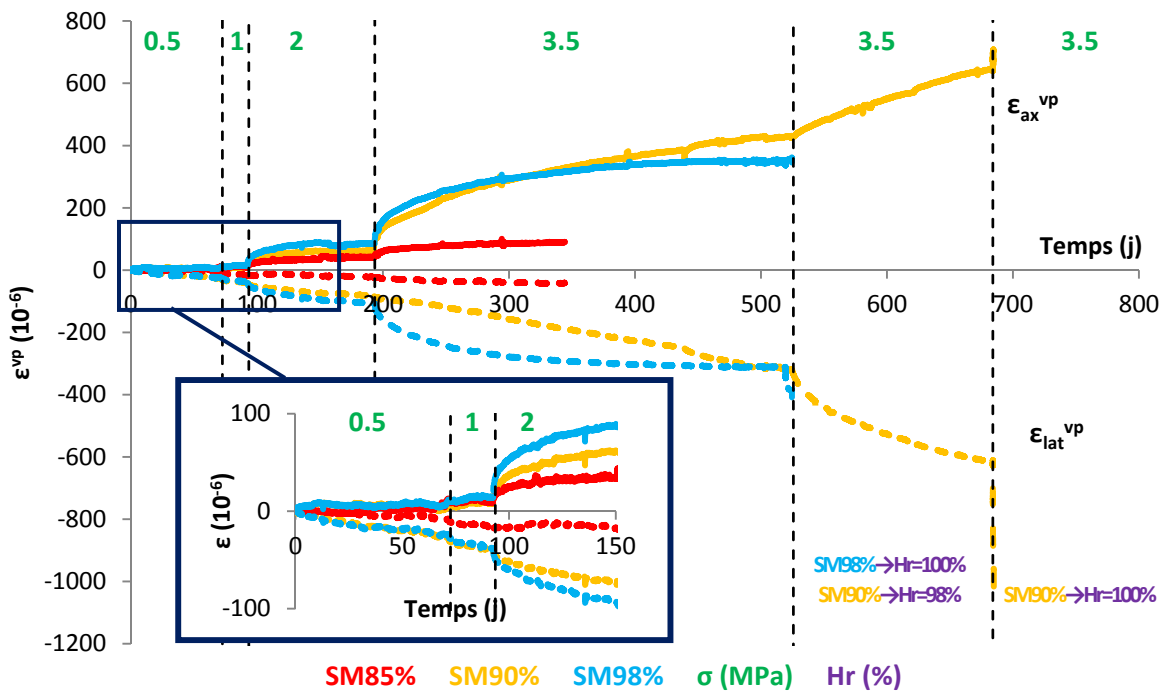


Figure V.5 : Courbes de fluage des échantillons de craie partiellement saturés prélevés dans la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées

Une des premières observations concerne l'amplitude des déformations viscoplastiques mesurées pour l'échantillon placé initialement à 85 % d'hygrométrie. Cette amplitude avant la rupture est faible et l'échantillon rompt brutalement sous forme de colonnes. Son comportement est plutôt contractant et son fluage s'effectue à volume constant pour le dernier palier de contrainte (avant la rupture). Son allure générale rappelle les essais effectués sur échantillons secs au même palier de contrainte.

Cet essai n'étant pas arrivé à terme et n'étant pas plus concluant, il n'en sera plus fait mention dans la suite du présent chapitre.

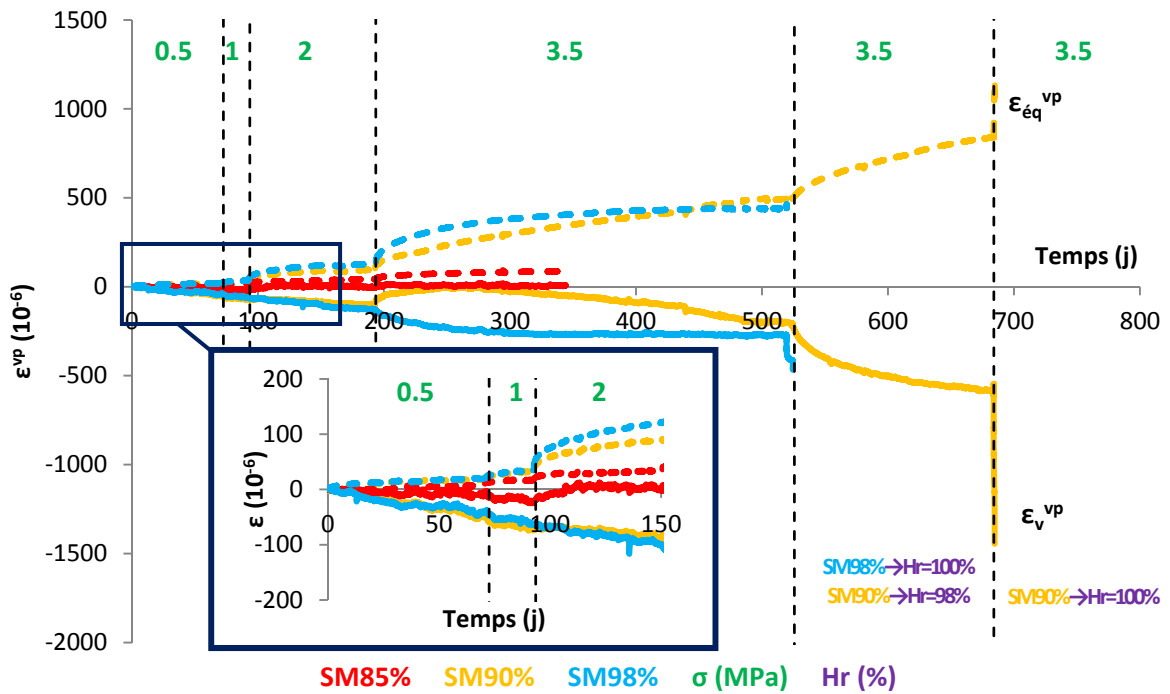


Figure V.6 : Courbes de fluage des échantillons partiellement saturés de craie de la carrière de Saint-Martin-le-Nœud. Déformations volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées

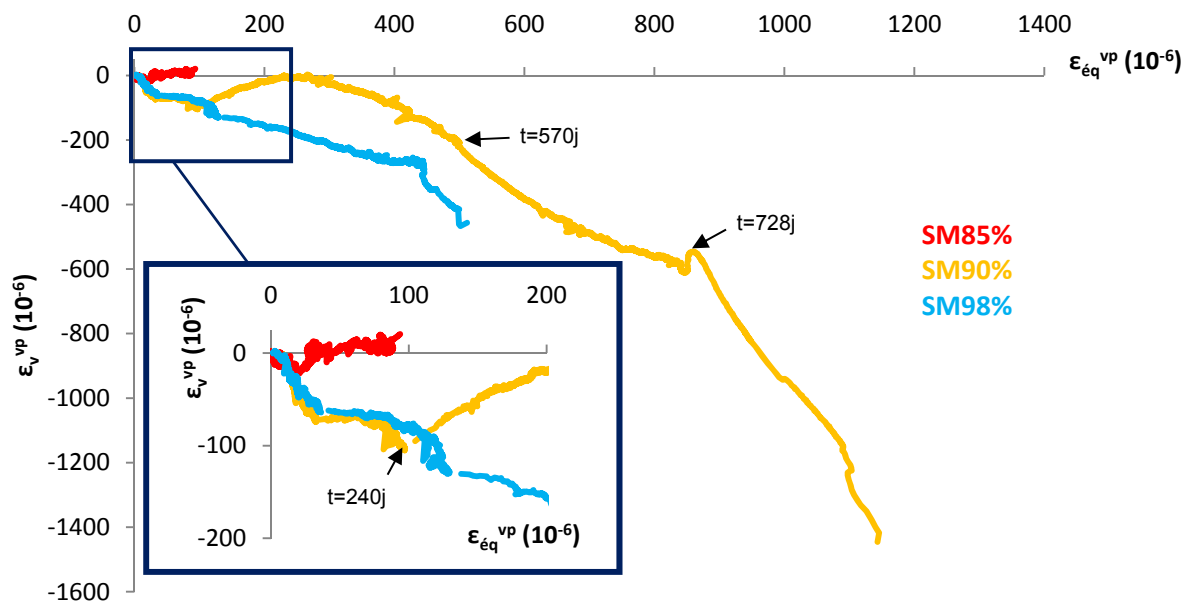


Figure V.7 : Déformations différées volumique ε_v^{vp} vs déviatorique $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie de Saint-Martin-le-Nœud. Série à hygrométrie contrôlée

Tableau V.6 : Vitesses moyennes de fluage axiales V_{fax} et latérales V_{flat} pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

	ρ_d	Paliers de contrainte appliquée (MPa) et vitesses de fluage ($10^{-11} s^{-1}$)											
		0.5 MPa		1 MPa		2 MPa		3.5 MPa		3.5 MPa - 1 ^{ère} Hr ↗		3.5 MPa - 2 ^e Hr ↗	
		V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}
SM85%	1.66	0.1	0.1	<0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	-	-	-	-
SM90%	1.68	0.1	0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.6	0.6	1.1	1.2	43.9	161.8
SM98%	1.61	<0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.4	0.2	0.2	1.2	3.5	-	-

Une analyse plus approfondie est donc effectuée sur les deux autres essais de fluage sur échantillons partiellement saturés (initialement à Hr=90 % et Hr=98 %). Chaque étape de ces essais est analysée en fonction de la réponse des échantillons aux sollicitations mécaniques et hydriques :

- Paliers de contrainte de 0.5, 1 et 2 MPa :

Pour une hygrométrie de départ supérieure ou égale à 90 %, le seuil d'enclenchement du fluage n'est atteint qu'à partir d'un déviateur de 2 MPa. Ce nouveau palier de contrainte présente l'établissement d'un fluage primaire (I) puis d'un fluage secondaire (II). Les déformations latérales restent proches des déformations axiales. Il est donc parfaitement logique que la craie montre un comportement dilatant. L'amplitude et les vitesses de déformation varient en fonction de l'hygrométrie imposée au départ (les dernières non linéairement).

- Palier de contrainte de 3.5 MPa :

Les deux échantillons observent l'établissement d'un fluage primaire puis d'un fluage secondaire. L'échantillon initialement placé à une hygrométrie de 90 % passe par une phase de contractance avant de retourner vers une phase de dilatance²⁰. Ses déformations sont essentiellement axiales. Les déformations viscoplastiques volumiques ne sont pas négligeables devant la distorsion mais sont essentiellement dilatantes. Notons qu'en comparaison des déformations viscoplastiques volumiques de ce palier, les déformations volumiques des paliers précédents sont négligeables. Par conséquent, ceci amène l'hypothèse d'un seuil de contrainte pour lequel les déformations viscoplastiques volumiques ne sont plus négligeables. En fin de palier, le fluage de l'échantillon initialement placé à Hr=98 % se fait à volume constant.

- Première augmentation de l'hygrométrie, passage à Hr=98 % :

L'échantillon initialement placé à 90 % d'hygrométrie présente une phase de dilatance lors du passage à une hygrométrie de 98 %. Les déformations se font essentiellement dans la direction latérale et très peu dans la direction axiale. Les

²⁰ Il pourrait également s'agir d'un artefact comme dans le cas des essais de fluage en condition sèche.

vitesses de déformation augmentent légèrement lors de ce palier. Il est intéressant de noter que la fin de la courbe déformations volumique vs distorsion correspondant à cet échantillon et à ce palier possède à peu près la même pente que celle de son homologue SM98% au palier de 3.5 MPa.

- Ennoyage :

Cette phase d'ennoyage amène la rupture brutale de l'échantillon en moins de trois jours. Les vitesses de déformation augmentent drastiquement. Le comportement reste dilatant.

La craie lors de cette série n'a observé aucune phase de fluage tertiaire (III). Les échantillons ont rompu en phase de fluage primaire (I) ou fluage secondaire (II). Son comportement visqueux est dilatant alors que son comportement instantané est contractant. Plus l'hygrométrie est importante, plus les déformations viscoplastiques sont importantes. La craie n'a pas présenté de fluage secondaire (II) permanent et repasse toujours par du fluage primaire (I) à chaque changement de palier.

V.3.2. Craie glauconieuse de la carrière d'Estreux

V.3.2.1. Série en condition sèche

V.3.2.1.1. Modules de déformation instantanés et résistances à long terme

Le Tableau V.7 présente les modules moyens calculés à partir des courbes de déformations instantanées pour les trois échantillons de craie. Il y est ajouté, en guise de comparaison, un des essais de compression à court terme (compression uniaxiale). Le détail pour chaque échantillon est donné en Annexe C.

Tableau V.7 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série en conditions sèches. Craie d'Estreux

	EXb2 (LT)	EXb4 (LT)	EXb6 (LT)	EX2 (CT sec)
ρ_d (g.cm ⁻³)	1.81	1.78	1.77	1.79
E (GPa)	8.12±2.29	5.08±1.22	5.62±1.49	7.08±0.66
ν	0.33±0.22	0.27±0.17	0.22±0.10	0.25±0.05
Résistance LT (MPa)	9.0	9.0	9.0	12.6
	(70% σ_c)	(70% σ_c)	(70% σ_c)	

Les trois échantillons de craie ont des masses volumiques de même ordre de grandeur et leur rupture est survenue lors du même palier de contrainte (9.0 MPa). La seule différence notable se trouve au niveau des paramètres élastiques. Autant les modules latéraux ne sont pas très éloignés autant le module élastique est multiplié par presque 1.5 d'un échantillon à l'autre. Toutefois, dans ce contexte de comportement à long terme, ce n'est pas parce que l'échantillon est plus raide qu'un autre qu'il résistera à une contrainte plus importante.

Les effets dus au fluage prennent donc le pas sur le comportement instantané. La résistance à long terme de la craie glauconieuse représente en moyenne 70 % de sa résistance à court terme à l'état sec.

V.3.2.1.2. Déformations de fluage

Les résultats d'essais sur échantillons secs de la craie d'Estreux (Figure V.8 et Figure V.9) présentent les déformations différées en fonction du temps avec indication du palier de contrainte appliquée. La Figure V.8 présente les déformations différées axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} , la Figure V.9 les déformations volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$.

La Figure V.10 présente les déformations volumiques ε_v^{vp} en fonction des déformations déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ (ou distorsion) différées. Les domaines de contractance et de dilatance correspondent aux domaines positif et négatif respectivement des déformations volumiques. Les courbes s'arrêtent à la rupture de l'échantillon. La Figure V.11 présente les formes de rupture de chacun des échantillons.

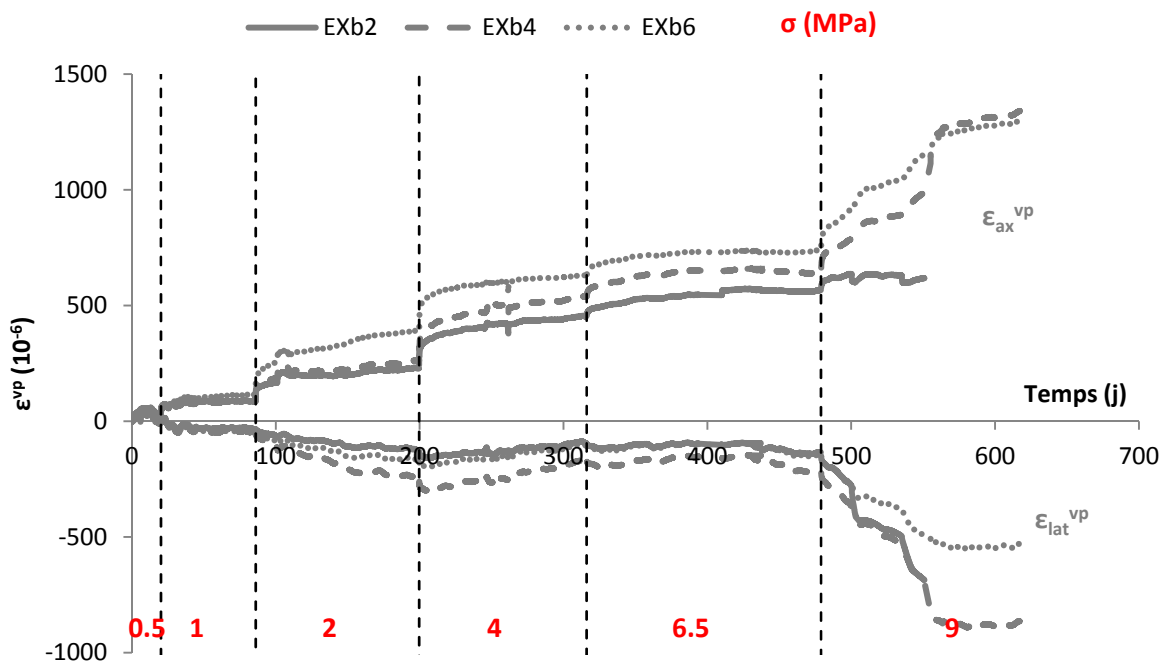


Figure V.8 : Courbes de fluage des trois échantillons secs de craie de la carrière d'Estreux. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées

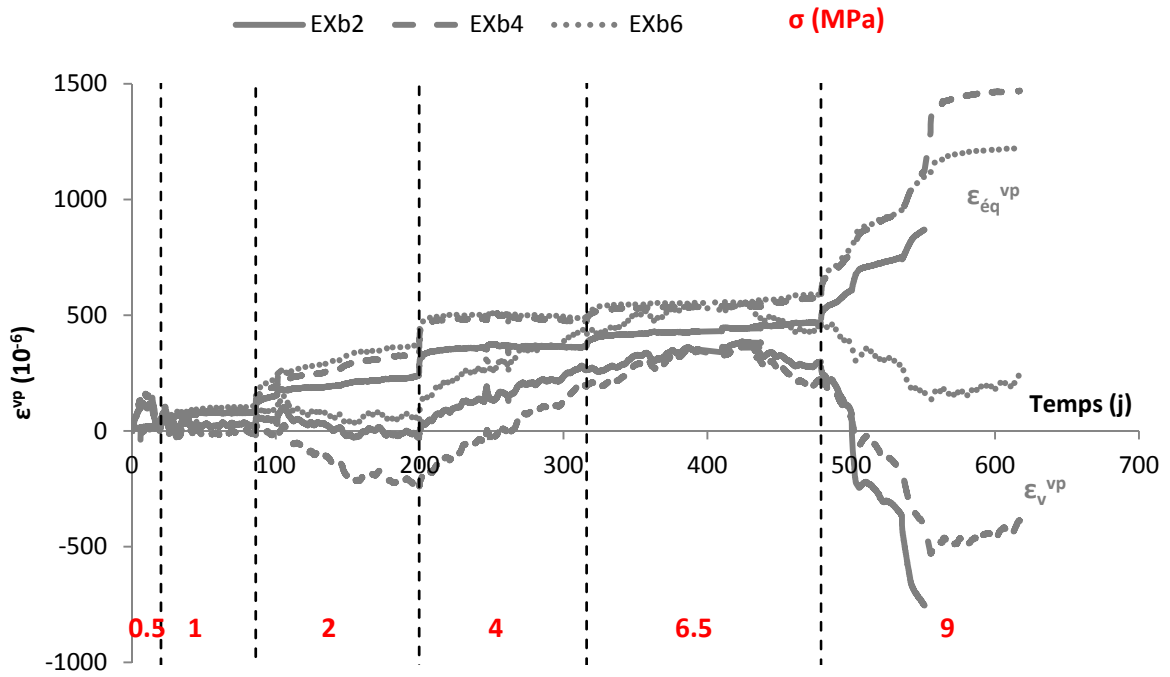


Figure V.9 : Courbes de fluage des trois échantillons secs de craie de la carrière d'Estreux. Déformations volumiques ϵ_v^{vp} et déviatoriques $\epsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées

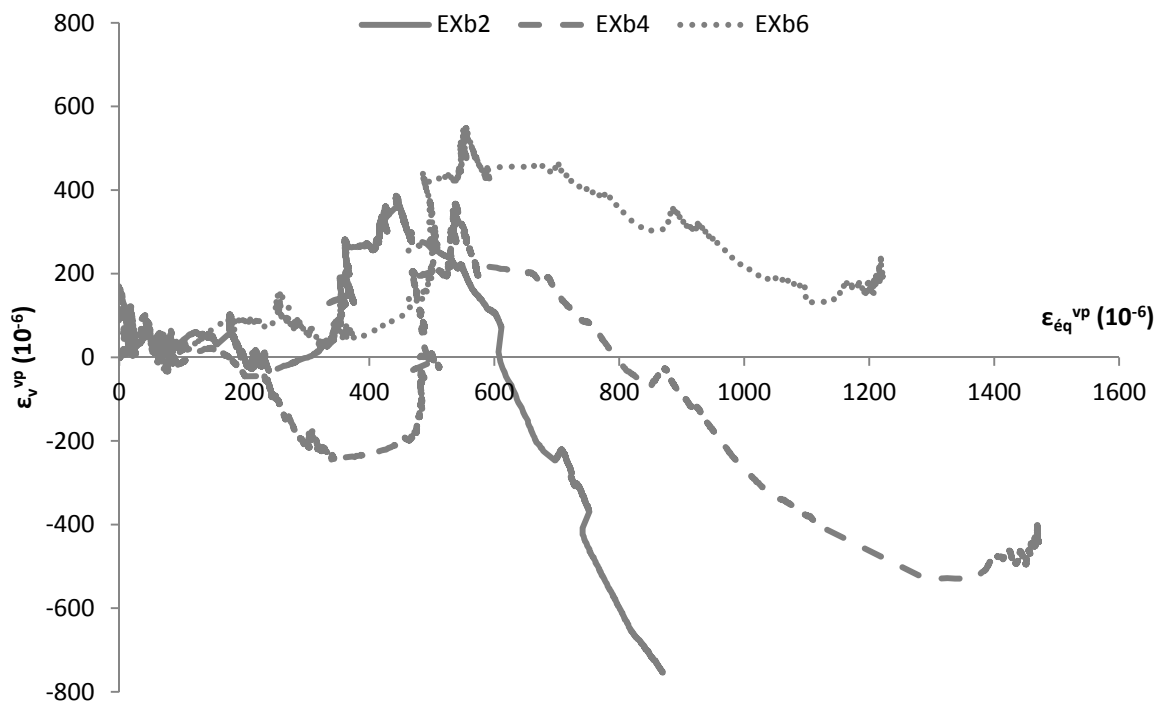


Figure V.10 : Déformations différées volumique ϵ_v^{vp} vs déviatorique $\epsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie d'Estreux. Série en condition sèche



Figure V.11 : Photographies des échantillons de fluage après essai montrant les formes de rupture. Série en condition sèche. Craie d'Estreux

L'analyse de ces courbes permet de faire les observations suivantes :

- la répétitivité de l'essai : les trois échantillons possèdent des comportements similaires, avec des amplitudes légèrement différentes ;
- le seuil d'enclenchement du fluage est de 1 MPa ;
- les déformations différées sont beaucoup plus importantes pour un même palier de contrainte que celles de la craie de Saint-Martin-le-Nœud. Ceci est dû en majorité au fait que le rapport entre modules élastiques des craies de Saint-Martin-le-Nœud et d'Estreux tourne autour de 2 ou 3 : la première est plus rigide que la seconde ;
- le fluage devient non négligeable pour une contrainte supérieure à 2 MPa, et se poursuit de manière rapide d'un fluage primaire sur un fluage secondaire ;
- le palier de 6.5 MPa est particulier. Jusqu'à ce palier, une phase de contractance est observée. Puis l'on observe au cours de ce palier, une stagnation des déformations viscoplastiques volumiques. En rapprochant cette « indéformabilité » latérale apparente pour un palier de contrainte importante à la forme de rupture (formes de blocs), il ne serait pas aberrant d'émettre l'hypothèse d'un endommagement des échantillons lors de cette phase. On observe toutefois le même phénomène de 365j observé pour la craie dolomitique ;
- chaque essai se solde par une accélération du fluage lors du palier à 9 MPa avant la rupture ;
- la forme de la rupture (Figure V.11) est assez classique de ce genre d'essai pour les matériaux poreux : tous les échantillons présentent une forme de rupture en sablier.

Cependant comme nous le verrons plus loin, et conformément aux attentes suite aux résultats sur son comportement à court terme, le fluage de la craie glauconieuse à l'état sec est minime en comparaison du fluage de cette même craie lorsque celle-ci est en présence d'eau.

V.3.2.2. Série à hygrométrie contrôlée

V.3.2.2.1. Modules de déformation instantanés et résistances à long terme

Le Tableau V.8 présente les modules moyens calculés à partir des courbes de déformations instantanées pour les trois échantillons de craie. Il y est ajouté, en guise de comparaison, un des essais de compression à court terme (compression uniaxiale). Le détail pour chaque échantillon (avec les vitesses de fluage pour chaque palier, hydrique comme mécanique) est placé en Annexe C.

Les trois échantillons de craie soumis aux essais de fluage en conditions partiellement saturées ont des masses volumiques situées dans le même ordre de grandeur (en tenant compte bien entendu des inévitables hétérogénéités du matériau).

Tableau V.8 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie d'Estreux

	EX85% (LT)	EX90% (LT)	EX98% (LT)	EX26 (CT sat)
ρ_d (g.cm ⁻³)	1.82	1.81	1.79	1.79
Hr initiale (%)	85	90	98	-
E (GPa)	5.25±0.07	3.25±1.11	3.08±0.94	3.30±0.40
ν	0.20±0.04	0.15±0.06	0.23±0.05	0.17±0.07
Résistance LT (MPa) après ennoyage	3.5 (70% σ_c)	Non rompu	3.5 (70% σ_c)	4.8

Les différents modules et coefficients de Poisson déterminés à partir des courbes correspondant aux phases de chargement ne varient pas en fonction de celles-ci.

Les effets dus au fluage prennent donc le pas sur le comportement instantané. La résistance à long terme de la craie glauconieuse représente en moyenne 70 % de sa résistance à court terme à l'état saturé.

V.3.2.2.2. Déformations de fluage

Les résultats d'essais sur échantillons à hygrométrie contrôlée de la craie d'Estreux présentent les déformations différées en fonction du temps avec indication du palier de contrainte appliquée.

La Figure V.12 présente les déformations différées axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} , la Figure V.13 les déformations volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Ces déformations sont toutes représentées en fonction du temps. La Figure V.14 présente les déformations volumiques ε_v^{vp} en fonction des déformations déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ (ou distorsion) différées. Les domaines de contractance et de dilatance correspondent aux domaines positif et négatif respectivement des déformations volumiques.

Chaque hygrométrie de départ est symbolisée par une couleur : rouge pour Hr=85 %, orange pour Hr=90 % et bleu pour Hr=98 %. Les diagrammes sont séparés en zones (entre pointillés) correspondant au palier de contrainte (vert) et/ou au palier hydrique (violet) appliqués. Les courbes s'arrêtent à la rupture de l'échantillon correspondant (sauf EX90%) et un zoom a été effectué sur le début des essais (voir encadré sur les figures).

Le Tableau V.9 donne les vitesses moyennes de déformation différée pour chaque palier. Elles sont calculées à partir de la pente de la droite de régression déformation-temps lors de la phase de fluage secondaire (II).

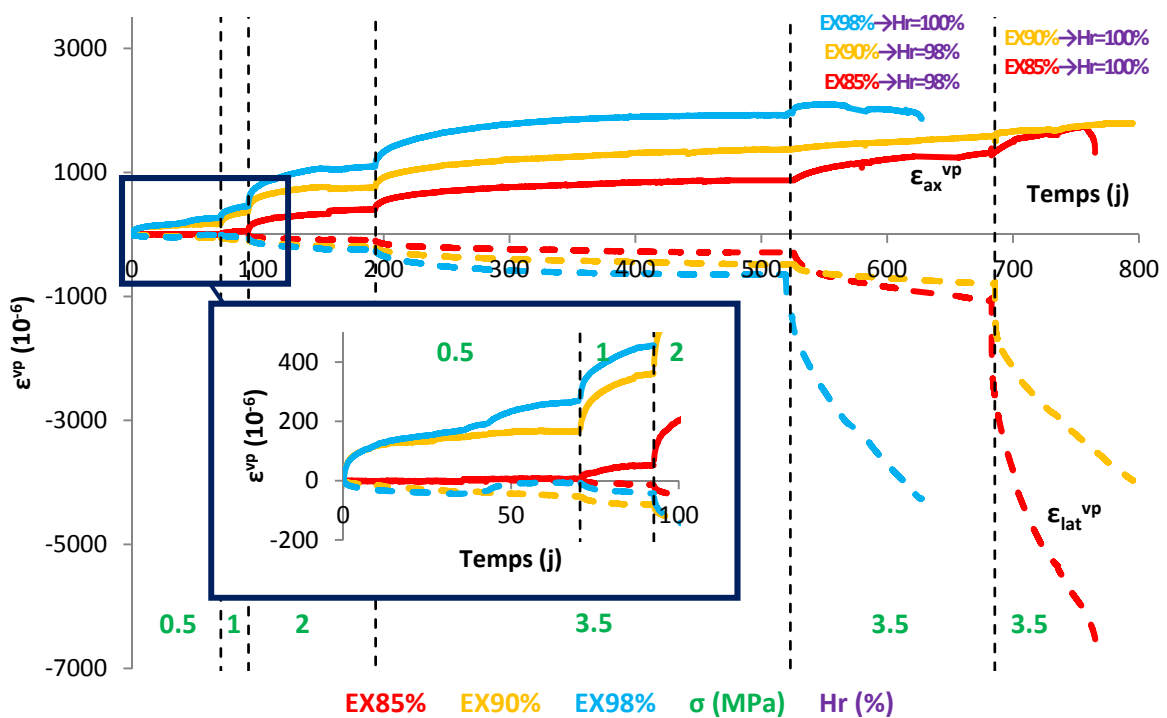


Figure V.12 : Courbes de fluage des échantillons partiellement saturés de craie de la carrière d'Estreux. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées

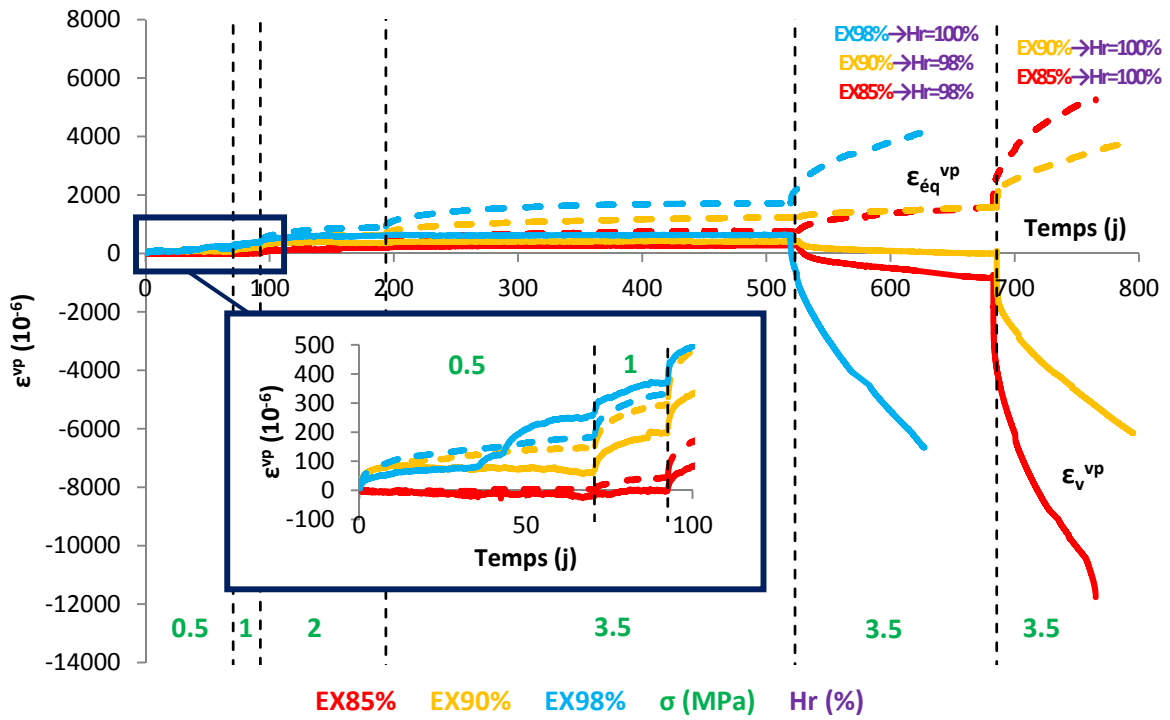


Figure V.13 : Courbes de fluage des échantillons partiellement saturés de craie de la carrière d'Estreux. Déformations volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées

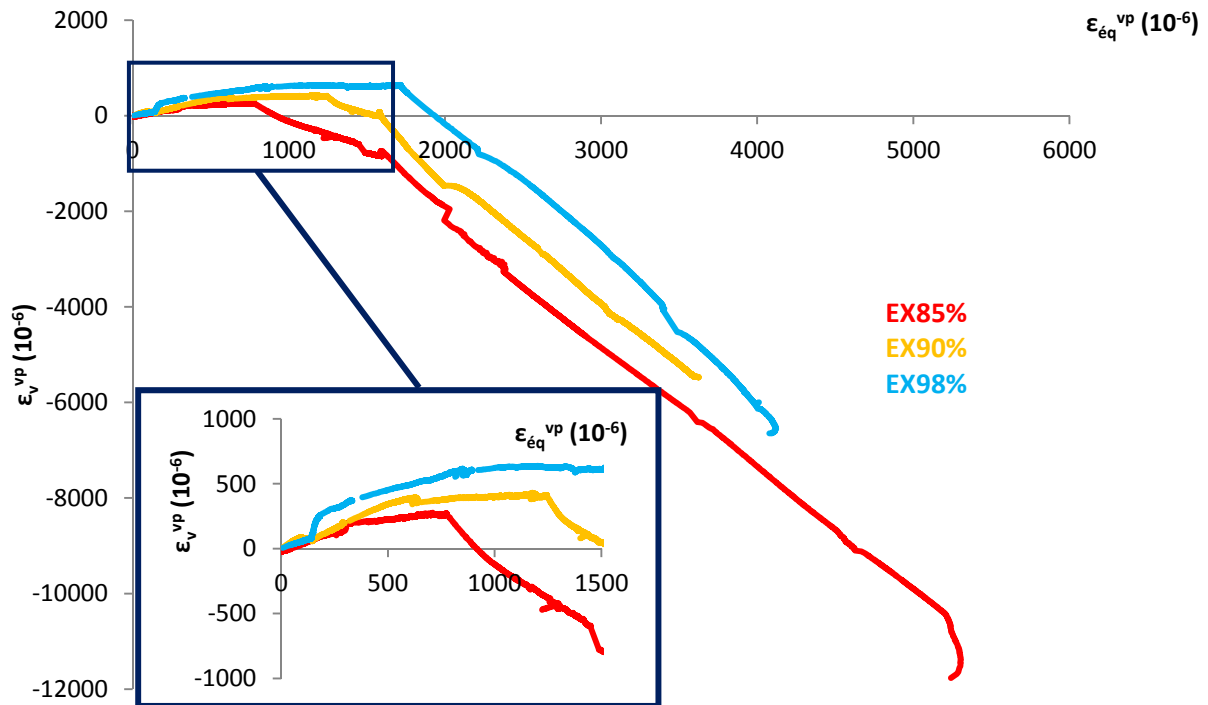


Figure V.14 : Déformations différées volumique ε_v^{vp} vs déviatorique $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie d'Estreux. Série à hygrométrie contrôlée

Tableau V.9 : Vitesses de fluage pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie d'Estreux

	ρ_d	Paliers de contrainte appliquée (MPa) et vitesses de fluage (10^{-11} s^{-1})											
		0.5 MPa		1 MPa		2 MPa		3.5 MPa		3.5 MPa - 1 ^{ère} Hr ↗		3.5 MPa - 2 ^e Hr ↗	
		V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}	V_{fax}	V_{flat}
EX85%	1.82	<0.1	<0.1	0.8	0.3	1.7	0.3	0.7	0.3	1.5	2.6	1.7	28.7
EX90%	1.81	0.7	0.5	3.4	0.3	0.8	0.5	0.7	0.4	1.0	1.0	1.4	16.8
EX98%	1.79	2.3	0.6	3.6	0.6	2.1	0.8	0.7	0.3	1.5	20.1	-	-

Chaque étape de ces essais sera analysée en fonction de la réponse des échantillons aux sollicitations mécaniques et hydriques :

- Paliers de contrainte de 0.5, 1 et 2 MPa :

Le seuil d'enclenchement du fluage est atteint dès le plus petit déviateur utilisé (0.5 MPa) pour les échantillons soumis au départ à une hygrométrie supérieure à 90 %. L'échantillon de craie glauconieuse placé initialement à 85 % d'hygrométrie n'atteint le seuil d'enclenchement du fluage que pour un palier de contrainte de 1 MPa (en accord avec les résultats de fluage à l'état sec). Le fluage de cette craie est essentiellement représenté par un fluage secondaire. Le fluage primaire n'est représenté que pour les premiers paliers de contrainte appliquée (et ce quelle que soit l'hygrométrie de départ) et de courte durée pour des contraintes appliquées plus importantes. Les déformations sont essentiellement axiales et augmentent non linéairement. Le comportement de la craie est contractant.

- Palier de contrainte de 3.5 MPa :

Pendant ce palier de contrainte, les échantillons encore soumis à l'hygrométrie de départ se déforment à volume constant et ceci quelle que soit l'hygrométrie. Les déformations viscoplastiques évoluent non linéairement.

- Palier d'hygrométrie pour un palier de contrainte, passage à 98 % :

Les échantillons initialement placés à 85 % et 90 % d'hygrométrie observent une phase de dilatance lors du passage à une hygrométrie de 98 %. Les déformations se font essentiellement dans la direction latérale et très peu dans la direction axiale. De plus, elles varient non linéairement. Le comportement de la craie passe de contractant à dilatant. Ce passage est logique avec l'augmentation des déformations latérales. Les courbes déformations volumiques vs distorsion correspondant à cette phase ont la même pente pour les deux échantillons.

- Ennoyage :

L'échantillon initialement placé à 85 % d'hygrométrie est le seul à avoir présenté une phase de fluage tertiaire avant sa rupture. Un ennoyage accentue le côté dilatant du comportement avec une augmentation significative des déformations latérales au détriment des déformations axiales.

Par ailleurs sur la Figure V.14, on peut observer ce qui suit. Chaque échantillon passe par une phase de contractance et une phase de stabilisation des déformations différées volumiques avant de passer par une phase de dilatance lors de l'augmentation de l'hygrométrie, et ceci quelle que soit l'hygrométrie de départ. La contractance ne se manifeste pas de la même façon suivant l'hygrométrie de départ. Néanmoins, lors de l'augmentation de l'hygrométrie, et ce quelle que soit l'hygrométrie de départ et pour une contrainte appliquée de 3.5 MPa, le coefficient directeur des courbes de la Figure V.14 est le même. L'hygrométrie de départ n'a par conséquent aucune influence sur le coefficient directeur de chaque portion de ces courbes : ce n'est donc pour chaque échantillon, uniquement que le couple $(\sigma, Hr)_t$ pris à un instant t qui agit sur ce coefficient directeur. Il n'y a donc pas d'influence de l'historique de la sollicitation $(\sigma, Hr)_t$.

Une analyse des déformations différées de chacune des étapes par lesquelles est passé l'échantillon placé initialement à 90 % permet d'avoir une vue d'ensemble des vitesses de déformation suivant le type de déformation étudié, mais également de déterminer l'élément déclencheur d'un changement de ces vitesses :

- la vitesse de déformation axiale ne varie pas ou peu (presque toujours inférieure à $1.10^{-11} \text{ s}^{-1}$ à la suite de chargements hydriques ou mécaniques) mais dépend de l'amplitude de la déformation viscoplastique axiale donc de l'hygrométrie appliquée ;
- la vitesse de déformation latérale ne varie pas ou peu suite à un chargement mécanique, mais augmente considérablement suite à un chargement hydrique, la vitesse la plus importante étant calculée lors de la phase d'engorgement.

V.3.3. Craie de la carrière de Château-Landon

V.3.3.1. Difficultés expérimentales

Malgré une attention toute particulière à la préparation des échantillons de craie de Château-Landon destinés aux essais de fluage uniaxial pour les deux séries, la plupart des résultats ne peuvent être exploités pour des raisons diverses :

- soit l'amplitude des déformations viscoplastiques n'est pas assez importante pour couvrir le « bruit » avant la rupture de l'échantillon (comme dans le cas de la craie de Saint-Martin-le-Noëud dans la série sèche). Ce fut le cas pour tous les échantillons de la série en condition sèche et l'échantillon placé initialement à une hygrométrie de 98 % ;
- soit les jauges se décollent empêchant alors toute mesure des déformations. Ce fut le cas pour tous les échantillons de la série à hygrométrie contrôlée.

Néanmoins, même si les jauges des échantillons à hygrométrie contrôlée se sont décollées, certaines se sont décollées suffisamment tard pour que les déformations puissent être enregistrées. C'est le cas de l'échantillon CH1-F ($Hr=85\%$).

V.3.3.2. Série en condition sèche

Les résultats d'essais sur échantillons secs de la craie de Château-Landon présentent les déformations différées en fonction du temps avec indication du palier de contrainte appliquée. La Figure V.15 présente les déformations différées axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} . Les courbes s'arrêtent à la rupture de l'échantillon correspondant. Le Tableau V.10 présente les modules moyens calculés à partir des courbes de déformations instantanées pour les trois échantillons de craie. Il y est ajouté en guise de comparaison un des essais de compression à court terme (compression uniaxiale en condition sèche). Les échantillons de la craie de Château-Landon ont des comportements différés similaires, d'où le choix de ne représenter qu'un seul d'entre eux.

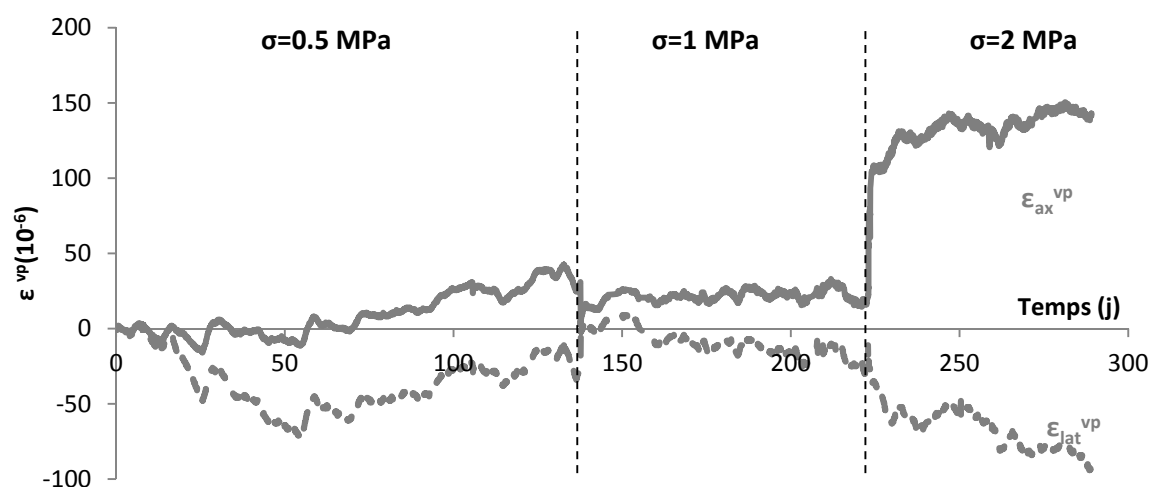


Figure V.15 : Courbes de fluage sur échantillon sec CH6-F de craie de la carrière de Château-Landon. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} et latérales ε_{lat}^{vp} différées

Tableau V.10 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculés à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série en conditions sèches. Craie de Château-Landon

	CH2-F (LT)	CH4-F (LT)	CH6-F (LT)	CH1 (CT sec)
ρ_d (g.cm ⁻³)	1.52	1.54	1.69	1.50
E (GPa)	4.83±1.04	3.6	5.80±1.13	4.80
ν	0.21±0.01	0.16	0.27±0.03	0.24
Résistance LT (MPa)	2.0 (50% σ_c)	2.0 (50% σ_c)	2.0 (50% σ_c)	4.5

Il s'avère, comme pour la craie de Saint-Martin-le-Noëud, qu'à sec, ce soit les déformations instantanées qui priment sur les déformations différées. La résistance à long terme représente 50 % de la résistance à court terme.

V.3.3.3. Série à hygrométrie contrôlée

Les résultats d'essais sur échantillons à hygrométrie contrôlée de la craie de Château-Landon présentent les déformations différées en fonction du temps avec indication du palier de contrainte appliquée.

Le Tableau V.11 présente les modules moyens calculés à partir des courbes de déformation instantanée pour les trois échantillons de craie.

Tableau V.11 : Valeurs moyennes (et écart-types) des caractéristiques élastiques calculées à partir des courbes de déformations instantanées et résistances à long terme pour la série à hygrométrie contrôlée. Craie de Château-Landon

	CH1-F(LT)	CH3-F(LT)	CH5-F(LT)
ρ_d (g.cm ⁻³)	1.50	1.53	1.50
Hr initiale (%)	85	90	98
E (GPa)	4.45±0.35	-	5.70
ν	0.23±0.04	-	-
Résistance LT (MPa)	Non rompu	Non rompu	Non rompu

Il se trouve que les modules de Young, lorsque ceux-ci ont pu être calculés, restent très proches des valeurs à l'état sec. Néanmoins, le manque de données (seul l'essai sur l'échantillon CH1-F a été concluant) empêche de statuer sur le rôle de l'hygrométrie sur le fluage de la craie de Château-Landon.

La Figure V.16 présente en fonction du temps les déformations différées axiales ε_{ax}^{vp} , latérales ε_{lat}^{vp} , volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ de l'échantillon CH1-F soumis initialement à une hygrométrie de 85 %. La Figure V.17 présente la déformation volumique ε_v^{vp} en fonction de la déformation déviatorique $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ (ou distorsion) différées de ce même échantillon. Les domaines de contractance et de dilatance correspondent aux domaines positif et négatif respectivement des déformations volumiques.

Les diagrammes sont séparés en zones (entre pointillés) correspondant au palier de contrainte appliqués. Les courbes s'arrêtent au décollement des jauges de l'échantillon correspondant.

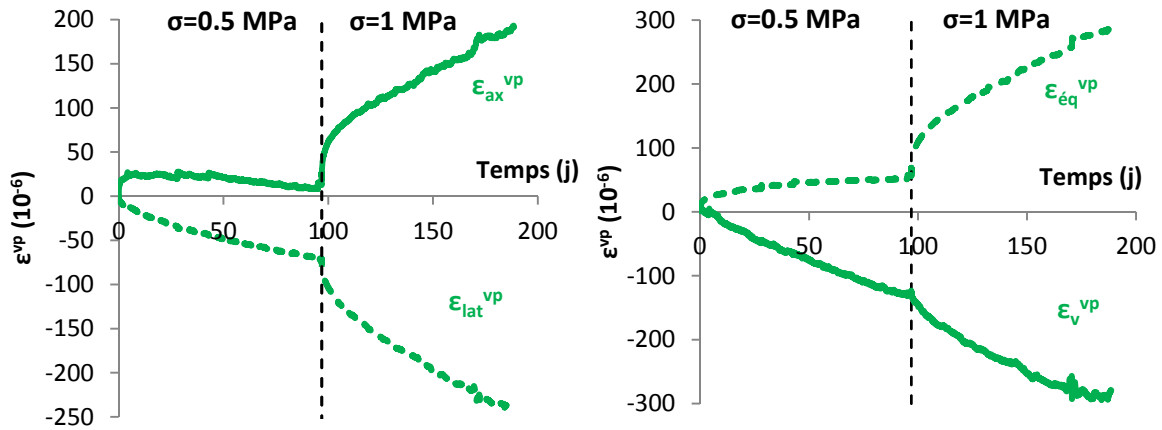


Figure V.16 : Courbes de fluage de l'échantillon CH1-F partiellement saturé (Hr=85 %) de craie de la carrière de Château-Landon. Déformations axiales ε_{ax}^{vp} , latérales ε_{lat}^{vp} , volumiques ε_v^{vp} et déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ différées

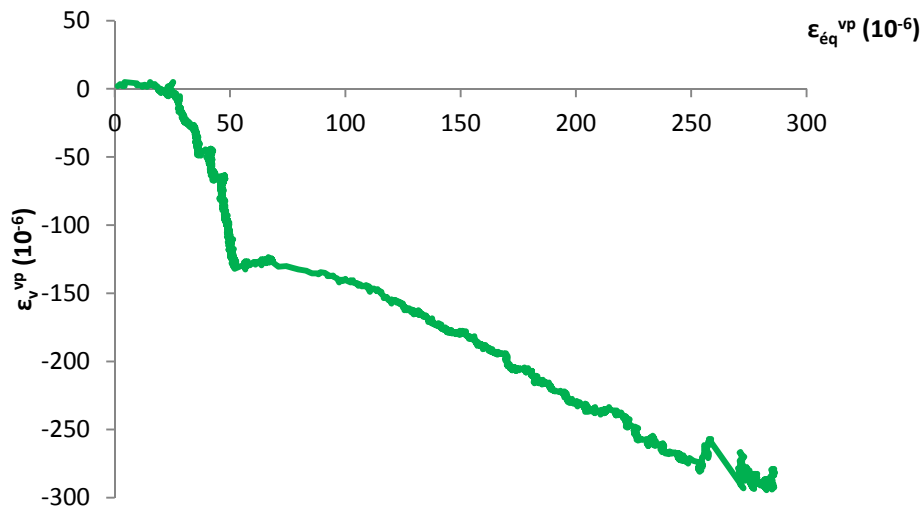


Figure V.17 : Déformations différées volumiques ε_v^{vp} vs déviatoriques $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$. Craie de Château-Landon. Échantillon CH1-F initialement soumis à Hr=85 %

Le fluage est enclenché dès le plus petit déviateur utilisé (0.5 MPa) et une hygrométrie de 85 %. Les déformations se font essentiellement latéralement²¹ ce qui confère à cette craie son comportement clairement dilatant (et ce dès le départ).

À l'augmentation du déviateur (passage à 1 MPa), les vitesses de déformation augmentent drastiquement, aussi bien dans la direction axiale que dans la direction latérale.

Malheureusement, le manque de données ne permet pas de statuer complètement sur le rôle exact de l'hygrométrie sur le fluage de cette craie.

²¹ La « diminution » des déformations axiales différées en fin de palier ne sont dues qu'à un artefact.

V.4. DONNÉES *IN SITU*

Les données *in situ* contribuent à aborder les questions relatives aux limites du champ d'expérimentation et à la fréquence d'occurrence des phénomènes environnementaux (remontée de la nappe, pluviométrie, etc...) ainsi qu'aux corrélations entre les différents phénomènes caractérisant l'interaction eau-roche.

V.4.1. Craie de Saint-Martin-le-Nœud

Le site de Saint-Martin-le-Nœud est le seul en France à instrumenter un pilier à l'interface entre les zones saturée et non saturée. Le site possède deux piliers instrumentés par l'INERIS respectivement en 2009 et 2012 :

- Pilier n°1 (section de 4 x 2 m et hauteur de 3 m, situé dans le Lac des Piliers à environ 30 m de profondeur) : 2 cannes de convergence entre le sommet et la base de pilier, 2 extensomètres à double ancrage (à 1 et 0.5 m) mesurant l'extension latérale du pilier, un capteur d'humidité, 3 sondes TDR (mesure de la teneur en eau du pilier à différentes profondeurs), un capteur d'hygrométrie (hors service actuellement) et une sonde de mesure des niveaux d'eau et de ses caractéristiques physico-chimiques (pH, température, ...). L'ennoyage du pilier est permanent (du fait de sa présence dans le lac) ;
- Pilier n°2 (section de 2 x 2.5 m et hauteur de 5 m, situé à environ 20 m de profondeur) : une canne de convergence, un capteur d'humidité, un capteur de température à 0.2 m de profondeur, un capteur de pression à 0.2 m de profondeur et un capteur d'humidité relative à 0.2 m de profondeur. L'ennoyage est contrôlé par une fosse creusée en base de pilier.

Jusqu'en 2012, la température au sein de la carrière (mesures au pilier n°1) varie de 0.08°C/an pour une température moyenne de 12.5°C (Gombert 2014). L'hygrométrie tourne autour de 100 %. Néanmoins, depuis l'ouverture d'un puits d'aération dans le but de faciliter la colonisation des carrières par les chauves-souris, la température au sein de la carrière suit une variation de fréquence similaire à celle de la température atmosphérique. Le pic maximal de température au sein de la carrière a un retard de 3 mois par rapport à celui de la température atmosphérique et l'amplitude maximale de variation est de 0.75°C. Un décalage de plusieurs mois existe entre les précipitations efficaces et les hautes eaux. Barhoum 2014 a calculé un retard moyen de 4.8 mois. La percolation a recommencé au cours du mois de Janvier 2013. Le pic de percolation fut de 1 mm/jour en mars 2013 au niveau du lac des piliers (cumul de 111 mm en 2 ans, Gombert 2014). La percolation doit représenter environ 5 % du volume total estimé du lac et l'eau apportée est moins minéralisée que l'eau déjà présente dans le lac (baisse de conductivité entre avant et après les pics de précipitation). La température de l'eau, variant autour de 10.5°C jusqu'en 2012, est tombée à 9.9°C suite à l'apport des lacs par les précipitations efficaces.

La Figure V.18 présente l'évolution de la déformation verticale en parallèle de l'ennoyage du pilier et de la percolation au toit. Ce qui est certain c'est que l'amplitude

des déformations semble légèrement corrélée aux variations du niveau d'eau mais pas aux percolations (pas d'impact significatif). Les résultats de la déformation verticale du pilier n°2 ne permettent pas pour l'instant de faire des interprétations géomécaniques (durée d'instrumentation trop courte).

La Figure V.19 présente l'évolution de la déformation horizontale en parallèle de l'ennoyage du pilier et de la percolation au toit. Selon Gombert 2014, en tenant compte de la différence de longueur des deux extensomètres, la déformation totale est de l'ordre de 2.10^{-4} en bord et de 6.10^{-5} en profondeur. Jusqu'à l'ouverture du puits, la totalité de l'extension du pilier se faisant en bord de pilier avec une vitesse de l'ordre $7.5 10^{-5}/\text{an}$ (contre $2.5 10^{-5}/\text{an}$ en profondeur). Suite à l'ouverture du puits, les courbes de déformation se présentent sous la forme d'un plateau. Pour l'instant, l'ennoyage et les percolations ne produisent aucun impact sur ces déformations : la durée d'instrumentation étant trop courte, la réponse du pilier n'a sans doute pas encore eu lieu (temps de mise à l'équilibre ?).

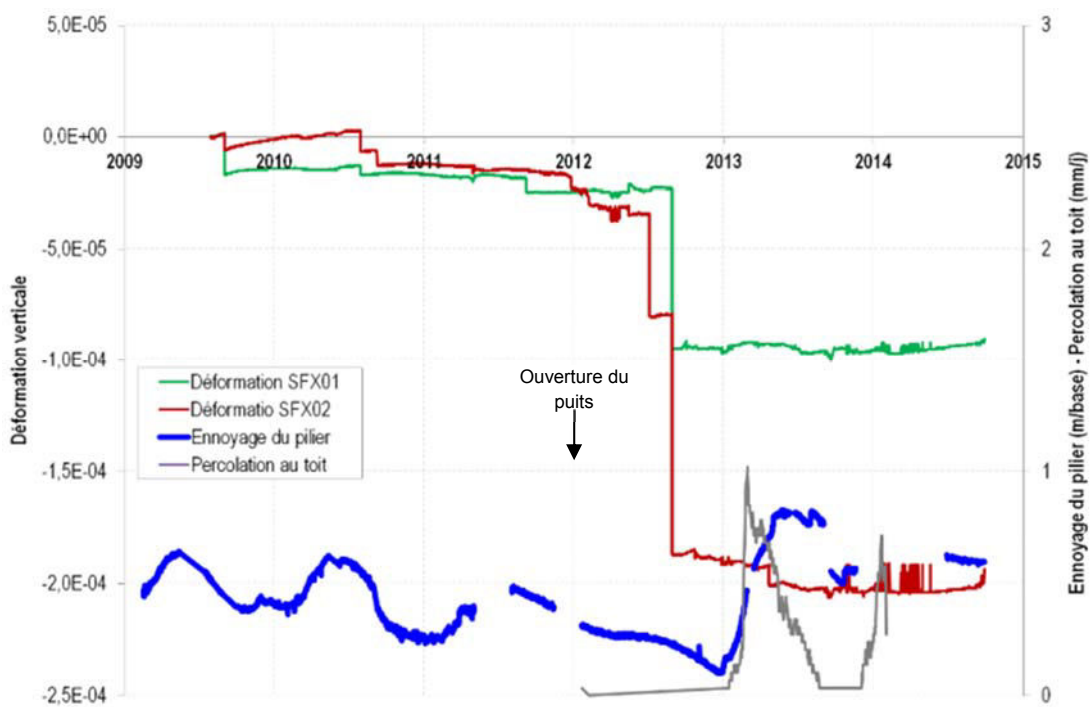


Figure V.18 : Évolution comparée de la déformation verticale du pilier n°1 sur deux faces non parallèles (SFX01 et SFX02) (Gombert 2014)

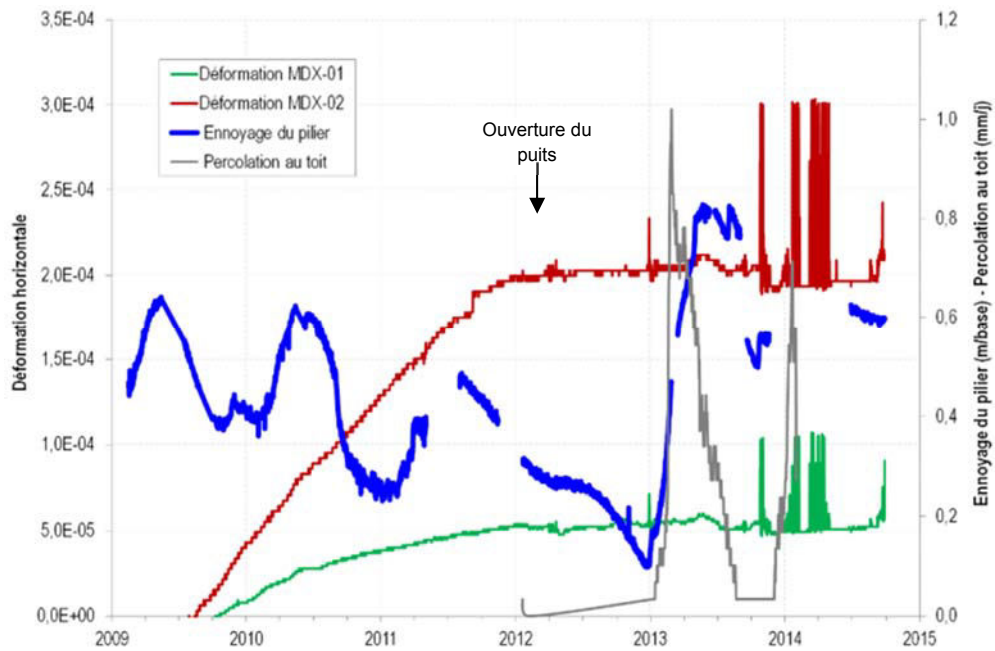


Figure V.19 : Évolution comparée de la déformation horizontale du pilier n°1 à deux profondeurs dans le pilier (MDX-01 à 1 m ; MDX-02 à 0.50 m) (Gombert 2014)

Les trois sondes TDR placées respectivement à une hauteur de 1 m (TDR-02 et TDR-03) et de 1.5 m (TDR-01) au-dessus du fond du lac et à une profondeur de 0.2 m (TDR-02) et 0.9 m (TDR-01 et TDR-03) dans le pilier mesurent la teneur en eau en divers endroits du pilier (Figure V.20, Gombert 2014).

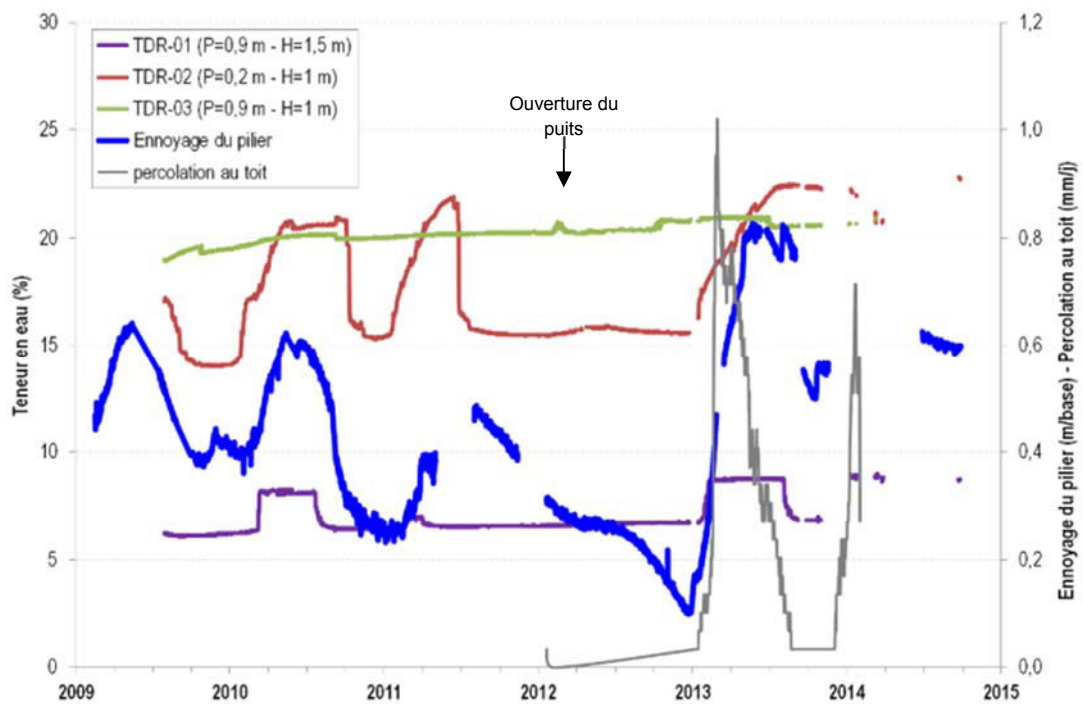


Figure V.20 : Évolution de la teneur en eau dans le pilier à différentes hauteurs et profondeurs en parallèle de l'ennoyage du pilier et de la percolation au toit (Gombert 2014)

La sonde la plus proche des parois (TDR-02) suit scrupuleusement les fluctuations du niveau d'eau du lac et des eaux de percolation et ce de manière cyclique. La teneur en eau à cet endroit varie d'un minimum de 15 % à un maximum de 22 %, en gardant une valeur constante (minimum) lors de la baisse du niveau du lac (effets de capillarité).

La sonde située à la même hauteur mais à une profondeur de 0.9 m (TDR-03) ne semble pas répondre aux variations du niveau du lac ou extrêmement peu et ce de manière très lente (valeurs autour de 20 %). Seul l'apport d'eau par les percolations au toit semble avoir eu un impact avec une augmentation rapide de 0.5 % de la teneur en eau.

La sonde la plus éloignée du niveau d'eau (TDR-01) suit une évolution du même type que la sonde la plus proche du bord (TDR-02) : elle montre une stabilité de la teneur en eau à 7 % avec des pics d'une amplitude de 2 % synchrones avec l'augmentation du niveau d'eau du lac (mais avec un décalage de 3 semaines) et des percolations au toit.

V.4.2. Craie d'Estreux

En 2004, la carrière a fait l'objet d'une instrumentation particulière suite à la découverte d'un ennoyage temporaire par l'eau de la nappe de la craie. Un pilier a été instrumenté par la société Métro-mesures à la demande de l'INERIS (Gombert 2014). Il comporte principalement un extensomètre (horizontal) double ancrage (à 0.10 m et 0.70 m de profondeur), une canne de convergence située à proximité du pilier et divers appareils (thermomètre, hygromètre, mesure de pression interstitielle, ...). Ont été rajoutés à la demande de l'INERIS en 2007 des capteurs supplémentaires de mesure des teneurs en O₂ et CO₂, de la pression barométrique et le niveau d'eau (piézomètre situé à proximité). Cependant, en raison de problèmes techniques, le dispositif préexistant – ayant arrêté de fonctionner de manière brutale en 2012 – a été remplacé par un dispositif plus robuste permettant de regrouper tous les capteurs. Ce dispositif a été installé par l'entreprise Cap Instrumentation en Novembre 2014. La Figure V.21 présente les fluctuations des paramètres mesurés en fonction du temps, en parallèle des fluctuations de la nappe. Il s'avère que le paramètre le plus affecté par les fluctuations est la déformation horizontale (Gombert 2014) : les fluctuations annuelles de l'extension moyenne sont de l'ordre de ± 0.04 mm à 0.70 m de profondeur et de ± 0.10 mm à 0.10 m de profondeur.

La déformation verticale semble quant à elle moins affectée (Gombert 2014). L'évolution de la convergence semble régulière tout au long de l'année. On constate cependant que des variations, de l'ordre de ± 0.02 mm, existent en lien avec le battement de nappe (Figure V.22).

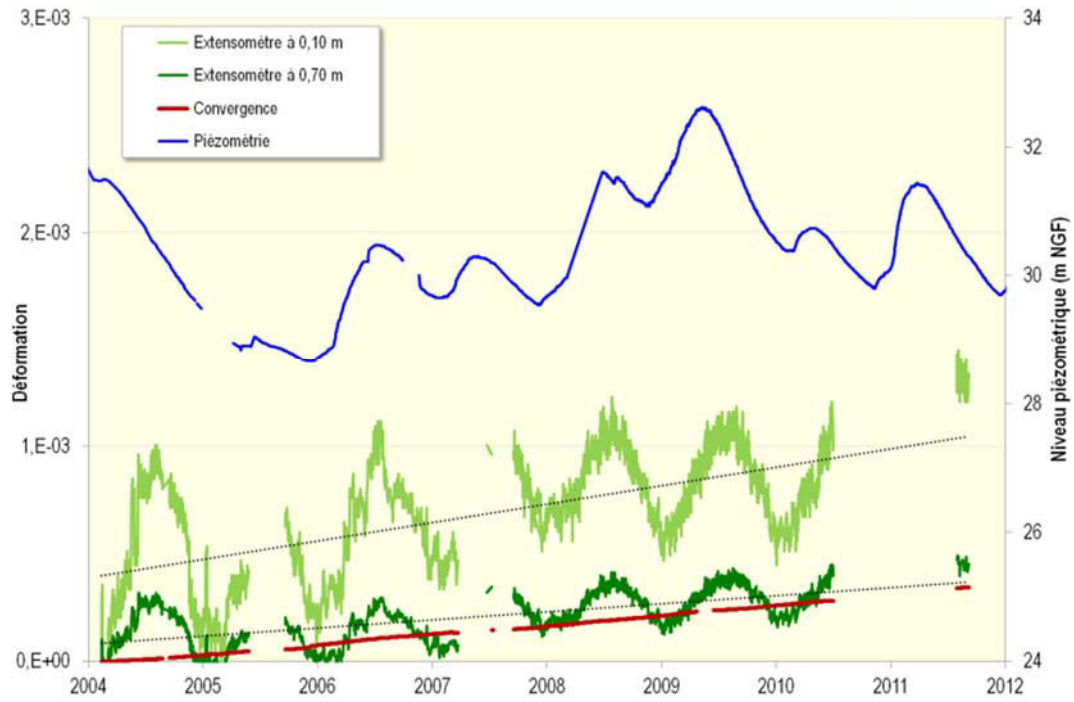


Figure V.21 : Fluctuation des paramètres mesurés sur le pilier de la carrière d'Estreux et du niveau de la nappe (Gombert 2014)



Figure V.22 : Variations de convergence et niveau de la nappe à Estreux (Gombert 2014)

V.4.3. Craie de Château-Landon

Le site de Château-Landon ne présente à ce jour aucune instrumentation de pilier au sein de la carrière. Depuis 2010, seul un capteur mesurant la pression, la température,

la conductivité et le niveau d'eau de manière automatique est présent dans un piézomètre installé sur le site.

V.5. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Les résultats obtenus pour les trois craies ont clairement montré l'influence de l'hygrométrie sur les déformations viscoplastiques pour un déviateur donné : en résumé, plus l'hygrométrie est importante, plus ces déformations sont importantes. Ceci est conforme à ce que l'on peut trouver dans la littérature sur le sujet (Nguyen 2009, Priol et al. 2004). Les vitesses de déformation (particulièrement dans la direction latérale) sont décuplées en présence d'eau et d'autant plus si l'humidité relative est importante. De plus, cela implique que la vitesse de déformation dépend de l'amplitude de celle-ci. La réponse des craies à la phase d'ennoyage reflète le caractère irréversible des déformations à l'injection d'eau (Priol 2005, Nguyen 2009). Cependant, l'hygrométrie ne constitue pas le seul moteur de cette augmentation des déformations entre l'état sec et l'état partiellement saturé.

Les deux craies de Château-Landon et de Saint-Martin-le-Noeud présentent un comportement différé à l'état sec négligeable devant leur comportement instantané (§ V.3.1.1 et V.3.3.2) alors que la craie glauconieuse (§ V.3.2.1) présente un fluage non négligeable à l'état sec. Pour comparaison, cette craie présente dans le cadre de son comportement instantané (cf. Chapitre III), un seuil d'initiation de la plasticité qui est bien plus bas que pour ses comparses pour lesquelles ce seuil est très proche de la résistance au pic. On retrouve alors certaines caractéristiques du comportement instantané des craies dans leur comportement à long terme en condition sèche, à savoir leur prépondérance à se plastifier ou non.

Pour un déviateur et une hygrométrie donnée (hors palier hydrique et ennoyage), la craie dolomitique de Saint-Martin-le-Noeud présente des déformations viscoplastiques axiales 3 à 5 fois inférieures à celles de la craie d'Estreux et de la craie de Château-Landon (elles-mêmes bien supérieures à celles de la précédente). Ceci est dû au fait que les modules élastiques de la craie dolomitique sont très nettement supérieurs à ceux des craies de Château-Landon et d'Estreux. Cependant les déformations viscoplastiques latérales sont du même ordre de grandeur pour les craies de Saint-Martin-le-Noeud et d'Estreux (toujours hors palier hydrique et ennoyage) et bien inférieures à celles de Château-Landon (rapport de 2 à 3). Ceci est dû au fait que les coefficients de Poisson des craies d'Estreux et de Château-Landon sont inférieurs à celui de la craie de Saint-Martin-le-Noeud. Pour de faibles hygrométries et contraintes, il n'y a presque pas de déformations viscoplastiques volumiques. De ce fait, celles-ci peuvent être négligées.

De plus, dans le cadre des séries à hygrométrie contrôlée, les trois craies présentent clairement un comportement dilatant. Il est intéressant de noter que le comportement des craies dolomitique et « pure » est dilatant à long terme alors que leur comportement est essentiellement contractant à court terme (jusqu'au pic de rupture). Par ailleurs, un comportement dilatant dans les craies n'est pas un indicateur

d'endommagement contrairement à la plupart des autres roches (Maranini et Brignoli 1999, Dahou et al. 1995). En effet, l'endommagement peut être soupçonné lorsque les propriétés élastiques (modules de Young, coefficient de Poisson) tendent à diminuer avec le chargement mécanique. Présentement, dans le cas des craies pour une hygrométrie donnée, ces propriétés ne changent pas en fonction de ce type de chargement. Cependant, dans le cadre des essais de fluage à l'état sec, un endommagement peut être soupçonné.

L'ennoyage et le chargement hydrique font cependant augmenter, et ce de manière non négligeable, les déformations viscoplastiques volumiques (Nguyen 2009, Priol et al. 2007, Risnes et al. 2005, Risnes et al. 2003, Delage et al. 1996, Josa et al. 1987). Les déformations viscoplastiques latérales de la craie d'Estreux s'envolent et le laps de temps entre l'ennoyage et la rupture de l'échantillon est long. Les déformations viscoplastiques volumiques de la craie de Saint-Martin-le-Nœud deviennent également non négligeables. Pour un palier de 3.5 MPa et un palier hydrique de Hr=98 % ou 100 %, les déformations viscoplastiques volumiques se développent (Megawati et al. 2013, Andersen et al. 2012, Madland et al. 2011, Xie et Shao 2006, Xie 2005). À court terme (cf. Chapitre III), pour ces hygrométries et déviateur le seuil de dilatance a été dépassé pour la craie d'Estreux. Cependant, on reste toujours dans la phase élastique pour la craie de Saint-Martin-le-Nœud.

Plusieurs explications sont apportées dans le but d'expliquer cette augmentation des déformations viscoplastiques lors des phases d'ennoyage et d'augmentation de l'hygrométrie. Les principaux mécanismes de compaction des roches sédimentaires lors de la diagenèse sont le glissement intergranulaire, la fracturation et la plastification des grains constitutifs, mais également le phénomène de pression-dissolution du ciment intergranulaire (Evans et al. 1999). Comme nous l'avons vu dans le Chapitre I, les liaisons entre les grains de la craie sont les éléments les plus fragiles. En effet, les grains de calcite constitutifs ont un module de cisaillement de l'ordre de 32 GPa (Ahrens 1995) et les groupes Ca et CO₃ de leur maille élémentaire sont reliés par des liaisons intramoléculaires (dites « fortes »). Les forces de Van der Waals (de faible intensité) constituant les liaisons entre grains nécessitent moins d'énergie pour se rompre que les liaisons ioniques (Parsegian 2005). Les phénomènes de pression-dissolution du ciment intergranulaire, de fracturation et de plastification des grains constitutifs ne sont donc pas les phénomènes ayant le plus de probabilité d'occurrence dans le fluage des trois craies. De plus, l'apport d'eau tend à changer la courbure des ménisques capillaires et par conséquent la force de traction capillaire participant à la cohésion de la craie (Risnes et al. 2005, Risnes et al. 2003).

Le glissement intergranulaire peut donc être considéré comme le principal phénomène (Nguyen 2009) prenant place dans la craie lorsque celle-ci flue (la présence de minéraux argileux comme la glauconie accentue encore le phénomène par le glissement intragranulaire des feuilletts). La contrainte se doit donc d'être suffisamment faible pour induire une plasticité (donc un glissement entre les grains) mais également

pour permettre à d'autres liaisons de Van der Waals de se former lorsque les autres se rompent.

Pour rappel, l'eau fait diminuer l'énergie de liaison entre les grains de la craie en remplaçant certaines liaisons entre cristaux, ce qui entraîne un abaissement du seuil de plastification (cf. Chapitres I et III) et peut favoriser le glissement intergranulaire (l'eau sert de lubrifiant). Par conséquent, il est logique de retrouver une augmentation des déformations viscoplastiques lors des paliers hydriques (augmentation de l'hygrométrie et ennoyage). Cette affirmation est conforme avec les données *in situ* présentées au § V.4. Dans le cadre de nos essais, et en se référant aux isothermes de sorption du Chapitre III (Figure III.8), la plage d'hygrométrie parcourue permet d'affirmer que l'eau au sein des échantillons est majoritairement adsorbée sous forme de multicouche et minoritairement condensée dans les microcapillaires. Lors de la phase d'ennoyage, l'eau présente dans la craie de Saint-Martin-le-Nœud est alors principalement libre et très faiblement liée au matériau. Elle ne permet plus d'assurer une cohésion suffisante et participe sous cette forme à la rupture des liaisons entre grains (liaisons faibles, ménisques entre grains...), ce qui entraîne la rupture brutale des échantillons. La craie d'Estreux est différente. Lors de la phase d'ennoyage, l'eau continue à être adsorbée sous forme de multicouche pendant le laps de temps de remise à l'équilibre. Le fait que la plage d'hygrométrie pour laquelle l'eau reste adsorbée sous forme de multicouche soit grande augmente le temps de mise en équilibre et retarde la rupture des échantillons dans le cas d'un ennoyage brutal²².

V.6. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était d'étudier l'influence de l'hygrométrie sur le comportement à long terme de trois craies. L'étude a été réalisée à l'aide de deux séries d'essais de fluage uniaxiaux pour chaque craie, une en condition sèche et une en condition saturée. Le bon déroulement des essais à hygrométrie contrôlée sur la craie de Château-Landon n'est pas total en raison de problèmes expérimentaux. Néanmoins, les protocoles utilisés ont permis d'obtenir des résultats concluants pour les craies d'Estreux et de Saint-Martin-le-Nœud.

Il a été montré lors de cette étude que le comportement différé des craies est fortement influencé par :

- la minéralogie/microstructure de la craie : la part argileuse de la craie d'Estreux lui confère des déformations viscoplastiques non négligeables devant les déformations instantanées à la différence des craies de Château-Landon et de Saint-Martin-le-Nœud ;
- l'hygrométrie : celle-ci augmente drastiquement l'amplitude des déformations viscoplastiques, et entraîne dans notre cas une augmentation de la vitesse de déformation différée ;
- le déviateur augmente également les déformations viscoplastiques ;

²² Ce retard peut être partiellement imputable aussi à une plus faible perméabilité.

- la relation entre la déformation volumique et la distorsion différée pour une même craie ne dépend que du couple déviateur – hygrométrie et non des paliers précédents ;
- en négligeant les amplitudes des déformations volumiques inférieures à 50 $\mu\text{m/m}$, il est établi que les paliers de 2 MPa de contrainte uniaxiale et de 98 % d'hygrométrie constituent les seuils d'enclenchement des déformations volumiques différées qui restent dilatantes (au moins pour les craies glauconieuse et dolomitique).

Les mécanismes supposés être à l'origine des déformations différées sont d'ordre physico-mécanique. Pour rappel (cf. Chapitre I et III), les grains de la craie sont reliés entre eux soit par coalescence soit par des liaisons de Van der Waals. À la différence des liaisons intragranulaires constituant les grains de calcite, ces liaisons sont de faible intensité. De plus, l'énergie de ces liaisons est inversement proportionnelle à la distance entre les deux particules. Plus les deux particules sont éloignées plus leur énergie de liaison est faible et plus facile à rompre. Sous l'effet du déviateur, lorsque celui-ci est bien inférieur au pic de rupture, il y a phénomène de frottement entre les grains et réagencement de ces grains au sein de la matrice. La plupart des liaisons intergranulaires (et intragranulaires dans le cas de la craie d'Estreux) dont l'énergie diminue sous l'effet de l'augmentation de la distance entre deux particules peuvent se rompre. Néanmoins, si le déviateur est suffisamment faible, il y a établissement de nouvelles liaisons faibles (d'énergie supérieure aux précédentes) à des endroits où elles seront thermodynamiquement plus stables, c'est à dire, lorsque les deux particules sont suffisamment proches. Le temps permet le rétablissement de cet équilibre thermodynamique. Sous l'effet de l'eau et selon la craie, l'énergie de ces mêmes liaisons diminue facilitant ainsi le glissement intergranulaire. Cependant, cet équilibre est rompu lorsque l'eau présente dans les pores est majoritairement libre et amenée de manière brutale sans que l'équilibre physico-chimique n'ait le temps de s'établir. Elle détruit les liaisons intergranulaires sans possibilité de rétablissement et provoque la rupture complète des échantillons.

Enfin, dans un cadre plus opérationnel et au-delà de la discussion, on peut globalement considérer :

- sous une contrainte inférieure ou égale à 2 MPa et une hygrométrie inférieure ou égale à 90 %, les déformations viscoplastiques volumiques peuvent être négligées ;
- au-delà c'est un mécanisme de dilatance différée qui prédomine.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de la thèse est d'étudier l'influence de l'eau et de l'interaction eau-roche sur le comportement mécanique à court et long terme des carrières souterraines de craie du Bassin Parisien.

Pour rappel, nombre de travaux précédents ont démontré l'importance du couplage hydromécanique dans le diagnostic de stabilité. La complexité du phénomène d'interaction eau-craie est due à de nombreux facteurs : la faible cohésion, la sensibilité aux fortes contraintes et aux forts confinements, les déformations et rupture différées (fluage), la porosité, la succion, la fatigue due aux cycles humidification/séchage (interaction eau-roche), les compositions minéralogique des craies et chimique des fluides saturants, et l'effondrement plastique des pores (« pore collapse »). À l'échelle du micromètre, la capillarité, les forces électrostatiques, les contacts entre les cristaux évoluent lorsque la craie est soumise à des sollicitations d'ordre mécanique, chimique, etc. Tous ces phénomènes font partie intégrante de l'interaction eau-craie et le poids de l'un ou l'autre de ces phénomènes varie en fonction de la craie considérée. Beaucoup d'auteurs ont tenté de quantifier et hiérarchiser les phénomènes constituant cette interaction les uns par rapport aux autres sans y parvenir de manière certaine. Une des contributions de la thèse en rapport avec ce sujet a été d'apporter des clarifications sur certains aspects de l'interaction eau-craie et les phénomènes s'y rattachant sur la base d'observations, mais également d'initier une hiérarchisation dans la prépondérance de ces phénomènes les uns par rapport aux autres en fonction de la craie étudiée.

De ce fait, en raison de la complexité de cette interaction démontrée dans la littérature, la démarche adoptée s'inscrivait dans le cadre d'une approche multi-échelles et multi-physiques de plus en plus utilisée par des équipes de recherche et applications en génies civil, minier et pétrolier, et plus globalement en géomécanique. Elle s'articulait autour de quatre grands axes :

- une revue de l'état de l'art ;
- un choix de sites expérimentaux couvrant les différents types de craie ;
- une mise en œuvre de moyens expérimentaux pour une caractérisation de ces craies ;
- une conceptualisation des phénomènes à partir des résultats expérimentaux dans le but de développer un modèle prédictif.

L'analyse bibliographique a permis non seulement de montrer la complexité de l'interaction eau-craie mais surtout qu'elle conditionne, en complément de la microstructure, et ce de manière considérable, le comportement mécanique de la craie. Elle a également montré que cette interaction n'était pas le seul phénomène à prendre en compte et que la hiérarchisation et l'interdépendance des différents phénomènes, à savoir lequel est prédominant par rapport à un autre ou comment l'un influe sur l'autre selon le cas étudié, n'était pas des plus simples. Cette analyse pose également les jalons de l'étude du « vieillissement » de la craie qui a été à notre connaissance beaucoup moins étudié que le comportement mécanique de la craie en fonction de l'hygrométrie.

Les trois carrières retenues pour l'étude possèdent des caractéristiques structurales et hydrogéologiques suffisamment différentes pour prétendre couvrir une certaine diversité de la craie. Ces carrières souterraines du Bassin Parisien sont les carrières de craie dolomitique de Saint-Martin-le-Nœud (60), de craie glauconieuse d'Estreux (59) et de craie de Château-Landon (77). Des données *in situ* relatives à ces carrières existent et sont recueillies continuellement par l'INERIS.

La partie expérimentale, essentiellement en partenariat avec GeoRessources, dont tous les protocoles pour l'étude des propriétés physiques et mécaniques à court terme sont normalisés (AFNOR), a occupé la majorité du temps de la thèse :

- l'étude des propriétés physiques des craies, que ce soit la texture, la porosité ou les propriétés de rétention d'eau ;
- l'étude du comportement des craies à court terme ;
- l'étude du comportement à long terme des craies ;
- l'étude du « vieillissement » de la craie, donc l'évolution des propriétés mécaniques et physiques des craies en fonction du temps ;
- l'interaction eau-roche sous contrainte (essai d'ennoyage).

Malgré quelques problèmes expérimentaux rencontrés, les essais de laboratoire se sont majoritairement bien déroulés et ont permis d'obtenir des résultats intéressants.

L'étude des propriétés physiques des craies à savoir la texture, la porosité et les propriétés de rétention d'eau a été effectuée. Outre le fait que les résultats sont cohérents avec ceux pouvant être trouvés dans la littérature, plusieurs caractères relatifs à cette étude peuvent être soulignés :

- les trois craies présentent des textures, des porosités et des minéralogies différentes : (a) la craie d'Estreux possède 24 % de glauconie et présente une texture de type packstone avec 35 % de porosité et un réseau poreux à une gamme de rayon de pores étendue ; (b) la craie de Saint-Martin-le-Nœud possède 14 % de dolomite et présente une texture de type wackestone avec 42 % de porosité et un réseau poreux à une seule gamme de rayon de pore très resserrée ; (c) la craie de Château-Landon présente une texture de type

mudstone avec une porosité de 44 %. Sa gamme de rayon de pores est plus resserrée que celle de Saint-Martin-le-Nœud ;

- les phénomènes prédominant dans l'interaction eau-roche pour chaque craie étudiée ne sont pas les mêmes selon la craie : (a) la physisorption est le caractère prédominant dans l'interaction eau-roche pour la craie glauconieuse d'Estreux, devant la capillarité. Ceci est en grande partie due à sa fraction de matériel argileux ; (b) la capillarité est le phénomène prédominant dans l'interaction eau-roche pour la craie dolomitique de Saint-Martin-le-Nœud ; (c) la craie de Château-Landon présente un cas intermédiaire.

L'étude des caractéristiques physico-mécaniques des craies a été réalisée à l'aide d'une étude du comportement mécanique en se rapprochant le plus fidèlement possible des conditions *in situ* (plusieurs confinements et hygrométries). Outre le fait que les résultats obtenus sont conformes à ceux trouvés dans la littérature, quelques caractéristiques sont à souligner :

- les différents seuils (initiation, rupture, ...) lorsqu'ils sont mesurés varient en fonction de l'hygrométrie quelle que soit la craie et pour un confinement donné ;
- le domaine élastique diminue également en fonction de l'hygrométrie ;
- les différents seuils ont tendance à voir leur valeur augmenter en fonction du confinement pour une même hygrométrie et ce, quelle que soit la craie. Le comportement post-pic radoucissant observé pour les craies tend vers une plasticité sans écrouissage lorsque le confinement augmente (ce qui est commun à la plupart des géomatériaux en exhibant une transition entre une rupture fragile et un comportement ductile). À l'état sec, un comportement ductile est observé pour une pression de confinement de 1 MPa pour la craie de Château-Landon et de 3 MPa pour les autres craies ;
- les module de Young et coefficient de Poisson de la craie dolomitique ne sont influencées ni par l'hygrométrie ni par le nombre de cycles (contrairement à la craie d'Estreux). Elle présente un comportement de type élastofragile sans confinement et la craie d'Estreux un comportement plutôt ductile (d'autant plus accentué que le confinement augmente) ;
- la craie de Château-Landon passe d'un comportement élasto-fragile à l'état sec (sans confinement) à un comportement ductile à l'état saturé avec une diminution très importante de sa résistance à la compression uniaxiale.

Les trois craies présentent un comportement élastoplastique sous chargement déviatorique, conformément à ce qui était attendu dans la littérature. Il a également été mis en évidence lors de l'étude des caractéristiques physico-mécaniques des trois craies que la minéralogie et l'énergie de liaison entre les grains étaient les premiers moteurs du comportement si particulier de la craie, et ce au même niveau que la porosité.

L'étude du vieillissement a été effectuée à l'aide d'une méthodologie d'étude de ces propriétés déjà appliquée pour le minerai de fer et le gypse en fonction de la profondeur dans le pilier et/ou de l'âge de l'exploitation de la mine ou de la carrière, même si dans le cadre de cette étude nous nous sommes limités au premier aspect (évolution le long de piliers). Des analyses des propriétés physiques (masses volumiques, vitesses d'onde, ...) et mécaniques (modules de Young, résistance à la compression uniaxiale, ...) ainsi que des analyses au MEB ont permis de mettre en évidence une différenciation entre le bord et le cœur de pilier pour les craies. Selon toute vraisemblance, la craie en provenance des carrières souterraines vieillit en présence d'eau. Son vieillissement se traduit de différentes façons et dépend de la nature de la craie et du milieu dans lequel elle évolue. De cette étude expérimentale, il a été montré que :

- si la craie comporte une part non négligeable de matériaux argileux ou évolue dans un milieu réducteur, ses propriétés se détériorent du cœur en bord de pilier. Cette configuration est classiquement retrouvée chez les autres géomatériaux naturels (gypse, minerai de fer, ...). On retrouve classiquement des traces de dissolution dans la craie, ce qui est un signe d'altération par l'eau ;
- si la craie évolue plutôt dans un milieu oxydant (oxygène, phosphates, ...), toute variabilité des données prises en compte, ses propriétés ont tendance à s'améliorer du cœur au bord de pilier. Si la circulation d'eau est importante et selon sa nature chimique : (a) Celle-ci a tendance à accentuer l'écart observé entre bord et cœur de pilier lorsqu'il y a alternance de phases de drainage vertical (imbibition et séchage, fractures en cœur, transport simplifié en cœur, passage difficile en bord de pilier, ...) ; (b) Elle a la possibilité d'augmenter la cinétique et déplacer l'équilibre des réactions chimiques spontanées prenant place dans la craie (mûrissement d'Ostwald, dissolution-recristallisation, ...).

Les répercussions de ce vieillissement sur la stabilité des carrières souterraines peuvent donc être dans certains cas de nature positive *a priori*. En effet, dans le cas d'une amélioration des propriétés physiques et mécaniques (pas d'agents réducteurs), les piliers de carrière gagnent en stabilité puisque la résistance ne diminue pas en fonction du temps. Le toit de la carrière reste maintenu. À *contrario*, si la craie évolue dans un milieu réducteur, le vieillissement de la craie devrait induire sur le long terme une désagrégation²³ de la craie en bord de pilier, impliquant un amincissement du pilier supportant le toit de carrière pouvant conduire à un effondrement.

L'étude de l'influence de l'hygrométrie sur le comportement à long terme des craies a été effectuée à l'aide d'essais de fluage uniaxial multi-paliers de contrainte (de 0.5 à 3.5 MPa) et d'hygrométrie (sec, 85 %, 90 % à 98 %). En fin de paliers (3.5 MPa et 98 %), les échantillons ont été soumis à un ennoyage brutal (simulation d'ennoyage

²³ Mais s'il y a ennoyage, il existe un risque de rupture brutale (Cf. Chapitre V).

brutal). Il a été montré lors de cette étude que le comportement différé des craies est fortement influencé par :

- la minéralogie/microstructure de la craie : la part argileuse de la craie d'Estreux lui confère des déformations viscoplastiques non négligeables devant les déformations instantanées à la différence des craies de Château-Landon et de Saint-Martin-le-Noëud ;
- l'hygrométrie : celle-ci augmente drastiquement l'amplitude des déformations viscoplastiques, et entraîne dans notre cas une augmentation de la vitesse de déformation différée ;
- le déviateur augmente également les déformations viscoplastiques ;
- la relation entre la déformation volumique et la distorsion différée pour une même craie ne dépend que du couple déviateur – hygrométrie et non des paliers précédents ;
- en négligeant les amplitudes des déformations volumiques inférieures à $50 \mu\text{m/m}$, il est établi que les paliers de 2 MPa de contrainte uniaxiale et de 98% d'hygrométrie constituent les seuils d'enclenchement des déformations volumiques différées qui restent dilatantes.

Les mécanismes supposés être à l'origine des déformations différées sont d'ordre physico-mécanique. Pour rappel, les grains de la craie sont reliés entre eux soit par coalescence soit par des liaisons de Van der Waals. À la différence des liaisons intragranulaires constituant les grains de calcite, ces liaisons sont de faible intensité. De plus l'énergie de ces liaisons est inversement proportionnelle à la distance entre les deux particules. Plus les deux particules sont éloignées plus leur énergie de liaison est faible et plus facile à rompre. Sous l'effet du déviateur, lorsque celui-ci est bien inférieur au pic de rupture, il y a phénomène de frottement entre les grains et réagencement de ces grains au sein de la matrice. La plupart des liaisons intergranulaires (et intragranulaires dans le cas de la craie d'Estreux) dont l'énergie diminue sous l'effet de l'augmentation de la distance entre deux particules peuvent se rompre. Néanmoins, si le déviateur est suffisamment faible, il y a établissement de nouvelles liaisons faibles (d'énergie supérieure aux précédentes) à des endroits où elles seront thermodynamiquement plus stables, c'est à dire, lorsque les deux particules sont suffisamment proches. Le temps permet le rétablissement de cet équilibre thermodynamique. Sous l'effet de l'eau et selon la craie, l'énergie de ces mêmes liaisons diminue facilitant ainsi le glissement intergranulaire. Cependant, cet équilibre est rompu lorsque l'eau présente dans les pores est majoritairement libre et amenée de manière brutale sans que l'équilibre physico-chimique ait le temps de s'établir. Elle détruit les liaisons intergranulaires sans possibilité de rétablissement et provoque la rupture prématurée des échantillons.

Les travaux de cette thèse confortent l'idée que la transposition des résultats de la caractérisation court terme au comportement long terme de la craie ne peut se faire de manière directe. Elle ne peut se faire de façon adéquate qu'avec la prise en compte des facteurs de réduction de ces propriétés mécaniques, à savoir le degré de

fracturation (même si non traité ici mais observé dans le cadre des auscultations des sites étudiés), le « vieillissement » ou les conditions hydriques du milieu par exemple. Ces facteurs de réduction doivent impérativement être pris en compte dans les retours d'expérience et être étudiés avec soin au cas par cas.

Enfin, sur la base des résultats expérimentaux obtenus et des modèles rhéologiques de comportement des géomatériaux très poreux, un modèle de comportement multimécanisme a été proposé par l'INERIS en conditions isothermes et isohygro-métriques. Il a fait l'objet d'une brève présentation en Annexe D. Ce modèle intègre les mécanismes suivants :

- cisaillement plastique : commun pour la plupart des matériaux à frottement interne. Les fonctions de charge les plus simples sont souvent basées sur le critère de Mohr-Coulomb et Hoek et Brown. Ici il s'agit du critère de Drucker-Prager qui a l'avantage de faire intervenir la contrainte principale intermédiaire. En particulier, les surfaces de charge initiale, au pic et résiduelle se basent sur ce critère ;
- une loi d'écoulement plastique non associée avec une possible transition contractance/dilatance ;
- une transition entre le comportement radoucissant (confinement faible à modéré) à ductile (confinement élevé relativement à la craie) ;
- « pore collapse » qui fait intervenir explicitement la porosité et décrit par le critère de Tvergaard (1981, 1990) ;
- traction qui est limitée par la résistance à la traction, sans écrouissage et une loi associée ;
- comportement à long terme qui est modélisé par une loi de type Lemaitre avec seuil en contrainte qui sera généralisée avec humidité relative, dans les prochains travaux.

La simulation d'essais de laboratoire (triaxiaux, effondrement des pores et fluage à sec) ont permis de valider cette implantation numérique et montrer le caractère opérationnel du modèle proposé. La première perspective de ce travail numérique est l'application à l'étude du comportement dans le temps d'une des carrières étudiées, confronter les résultats aux mesures *in situ* et d'enrichir le modèle en l'étendant aux couplages hydromécaniques en conditions saturées, puis non saturées (une fois les coefficient et module de Biot obtenus).

D'un point de vue expérimental, les perspectives de ce travail peuvent s'articuler autour des points suivants.

On s'attend classiquement à trouver une résistance un peu plus importante au cœur d'un pilier de carrière que sur ses bords. C'est ce qu'on observe globalement dans le cas de la craie d'Estreux. Les résultats sont plus inattendus dans le cas de la craie de Saint-Martin-le-Nœud puisque l'on observe (en tout cas pour le pilier pilote) un cœur légèrement moins résistant que les bords (à noter toutefois que les mesures de résistance faites dans la carrière de craie phosphatée de la Malogne à Cuesmes,

près de Mons en Belgique semblent également montrer une tendance à la baisse vers l'intérieur du pilier). Cette « anomalie » présente pour les craies de Saint-Martin-le-Nœud et de Mons, mais absente pour la craie d'Estreux, renforce l'hypothèse d'une combinaison des facteurs avec la part de chacun à déterminer au cas par cas.

Afin d'approfondir le sujet, une étude similaire sur des sondages verticaux dans des piliers devrait être en mesure d'apporter également des clarifications sur l'évolution verticale des propriétés de la roche, mais également compléter l'évolution d'autres facteurs intrinsèques à la craie et en particulier les courbes de rétention de la craie entre le bord et le cœur de pilier. De même, des sondages horizontaux à même le massif – donc théoriquement traversant la partie « saine » – devraient pouvoir nous renseigner si les phénomènes observés dans les piliers s'appliquent ou non ailleurs dans la carrière.

Les travaux de cette thèse sur le comportement à long terme des craies ont donné des résultats encourageants et de bonne qualité. La poursuite et le perfectionnement de ce type d'essais sur ces craies se doivent d'être envisagés. De plus, il est admis dans la littérature que les roches carbonatées sont sensibles à la concentration en CO₂ puisqu'elles font partie intégrante du cycle du carbone. Une des propositions serait de déterminer l'effet de la concentration en CO₂ dissous dans l'eau sur le comportement à long terme des craies. Cette remarque est valable également avec l'oxygène.

En regard des résultats obtenus dans cette thèse, et la confirmation que l'énergie de liaison entre grains est l'un des acteurs principaux du comportement mécanique avec (ou devant selon le cas ?) la porosité, un approfondissement dans l'étude de l'énergie de liaison entre les grains des craies et de l'évolution de celle-ci lors d'un chargement mécanique ou hydrique devrait éclairer davantage la question.

Finalement, une des perspectives ultimes de ce travail serait l'aboutissement d'une méthodologie d'étude/caractérisation des craies globale, donnant la marche à suivre en fonction du type de craie étudiée, de manière à pouvoir prédire le comportement de la craie étudiée. Les bases de cette méthodologie sont posées tant d'un point de vue expérimental (chapitre 3, 4 et 5) que rhéologique et numérique (Annexe D).

Références bibliographiques

Abdallah W., Gmira A. (2013). Wettability assessment and surface compositional analysis of aged calcite treated with dynamic water. *Energy and Fuels* 28, 1652-63.

Abdulraheem A., Zaman M., Roegiers J.-C. (1993). Numerical simulation of a compacting reservoir. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 30 (7), 1299-1302.

Ahrens T.J. (1995). *Mineral Physics and Crystallography: a Handbook of Physical Constants*. Washington (D.C.): American Geophysical Union.

Alam M.M., Fabricius I.L., Christensen H.F. (2012). Static and Dynamic Effective Stress Coefficient of Chalk. *Geophysics* 77 (2), L1-11.

Alonso E.E., Gens A., Josa A. (1990). A Constitutive Model for Partially Saturated Soils. *Geotechnique* 40 (3), 405-30.

Andersen M., Foged N., Pedersen H.F. (1992). The Link between Waterflood-Induced Compaction and Rate Sensitive Behavior in a Weak North Sea Chalk. In *Proceedings of the 4th North Sea Chalk Symposium*. Deauville, France.

Andersen P.O., Evje S., Madland M.V., Hiorth A. (2012). A Geochemical Model for Interpretation of Chalk Core Flooding Experiments. *Chemical Engineering Science* 84, 218-41.

Arairo W. (2013). *Influence des cycles hydriques de la dessiccation et de l'humidification sur le comportement hydromécanique des géomatériaux non saturés*. Thèse de doctorat, Université de Lyon.

Arvidson R.S., Ertan I.E., Amonette J.E., Luttge A. (2003). Variation in Calcite Dissolution Rates: A Fundamental Problem? *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 67 (9), 1623-34.

Aubertin M., Li L. (2004). A porosity-dependent inelastic criterion for engineering materials. *International Journal of Plasticity* 20 (12), 2179-2208.

Auvray C. (2003). *Vieillissement et comportement rhéologique du gypse*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Auvray C., Homand F., Sorgi C. (2004). The Aging of Gypsum in Underground Mines. *Engineering Geology* 74 (3-4), 183-96.

Bahat D., Rabinovitch A., Frid V. (2001). Fracture Characterization of Chalk in Uniaxial and Triaxial Tests by Rock Mechanics, Fractographic and Electromagnetic Radiation Methods. *Journal of Structural Geology* 23 (10), 1531-47.

Baillon F., Loubignac E. (2007). Sciences et Technologies des Poudres. http://nte.mines-albi.fr/STP/co/STP_web.html.

Baker P.A., Kastner M., Byerlee J.D., Lockner D. A. (1980). Pressure dissolution and hydrothermal recrystallization of carbonate sediments – an experimental study. *Marine Geology* 38, 185-203.

Barhoum S. (2014). *Transferts dans la craie: approches locale et régionale*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

Bathe K.-J., Snyder M.D., Cimento A.P., Rolph W.D. (1980). On some current procedures and difficulties in finite element analysis of elastic-plastic response. *Computers & Structures* 12 (4), 607-24.

Baud P., Vajdova V., Wong T. (2006). Shear-Enhanced Compaction and Strain Localization: Inelastic Deformation and Constitutive Modeling of Four Porous Sandstones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111 (B12).

Beck K. (2006). *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.

Bell F.G., Culshaw M.G., Cripps J.C. (1999). A Review of Selected Engineering Geological Characteristics of English Chalk. *Engineering Geology* 54 (3-4), 237-69.

Belova D.A., Johnsson A., Bovet N., Lakshatanov L.Z., Stipp S.L.S. (2012). The Effect on Chalk Recrystallization after Treatment with Oxidizing Agents. *Chemical Geology* 291, 217-23.

Bisnovat K., Hatzor Y.H., Vinegar H.J., Nguyen S.V., Palchik V., Feinstein S. (2015). Mechanical and petrophysical behavior of organic-rich chalk from the Judea Plains, Israel. *Marine and Petroleum Geology* 64, 152-64.

Bivert B. (1988). *Les souterrains du Nord-Pas-de-Calais*. Conseil général, Département du Nord (59).

Bois A.P. (2000). Pasachalk Research Project - Evaluation after two years. Rapport interne AmsaTech (non publié).

Brignoli M., Santarelli F., Righetti C. (1994). Capillary Phenomena in an Impure Chalk. In *Proceedings of the 2nd Joint SPE/ISRM Rock Mechanics Conference: Rock Mechanics in Petroleum Engineering (EUROCK 94)*, 837-44. Delft, Netherlands.

- Brignoli M., Santarelli F., Righetti C. (1994). Capillary Phenomena in an Impure Chalk. In *Proceedings of the 2nd Joint SPE/ISRM Rock Mechanics Conference: Rock Mechanics in Petroleum Engineering (EUROCK 94)*, 837-44. Delft, Netherlands.
- Brignoli M., Santarelli F., Righetti C. (1994). Capillary Phenomena in an Impure Chalk. In *Proceedings of the 2nd Joint SPE/ISRM Rock Mechanics Conference: Rock Mechanics in Petroleum Engineering (EUROCK 94)*, 837-44. Delft, Netherlands.
- Brignoli M., Sartori M. (1993). Incremental constitutive relations for the study of wellbore failure. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* 30 (7), 1319-22.
- Broux A. (2010). *Détermination des paramètres hydriques des roches par mesures soniques. Etude expérimentale et développement d'une méthode d'interprétation*. Mémoire de fin d'étude, Université Libre de Bruxelles.
- Brunauer S., Deming L.S., Deming W.E., Teller E. (1940). On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *Journal of the American Chemical Society* 62 (7), 1723-32.
- Carroll M.M. (1991). A critical state plasticity theory for porous reservoir rock. *Recent Advances in Mechanics of Structured Continua* 117, 1-8.
- Chen W.-F., Mizuno E. (1990). *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics: Theory and Implementation*. Elsevier.
- Chene G., Bastian G., Brunjail C., Laurent J.P. (1999). Accelerating weathering of « tuffeau » blocks submitted to wetting-drying cycles. *Materials and Structures* 32 (221), 525-32.
- Chigira M., Oyama T. (2000). Mechanism and Effect of Chemical Weathering of Sedimentary Rocks. *Engineering Geology* 55 (1-2), 3-14.
- Chou L., Garrels R., Wollast R. (1989). Comparative-Study of the Kinetics and Mechanisms of Dissolution of Carbonate Minerals. *Chemical Geology* 78 (3-4), 269-82.
- Collin F., Cui Y.J., Schroeder C., Charlier R. (2002). Mechanical Behaviour of Lixhe Chalk Partly Saturated by Oil and Water: Experiment and Modelling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 26 (9), 897-924.
- Cristescu N. (1986). Damage and Failure of Viscoplastic Rock-Like Materials. *International Journal of Plasticity* 2 (2), 189-204.

Dagallier G., Grgic D., Homand F. (2002). Mineralogical and microtextural characterisation of the anthropic-origin ageing of iron ore in Lorraine (France). *Comptes Rendus Geoscience* 334 (7), 455-62.

Dahou A., Shao J., Bederiat M. (1995). Experimental and Numerical Investigations on Transient Creep of Porous Chalk. *Mechanics of Materials* 21 (2), 147-58.

Daïan J.F. (2013). *Equilibre et transferts en milieux poreux*.

Datcheva M. (2001). Constitutive modelling of the creep behaviour of chalk. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 31 (2), 53-64.

Davis R.O., Selvadurai A.P.S. (2005). *Plasticity and Geomechanics*. Cambridge University Press.

De Gennaro V., Delage P., Cui Y.J., Schroeder C., Collin F. (2003). Time-Dependent Behaviour of Oil Reservoir Chalk: A Multiphase Approach. *Soils and Foundations* 43 (4), 131-47.

De Gennaro V., Delage P., Priol G., Collin F., Cui Y.J. (2004). On the Collapse Behaviour of Oil Reservoir Chalk. *Geotechnique* 54 (6), 415-20.

De Gennaro V., Pereira J.M. (2008). Viscoplastic Modelling of Unsaturated Geomaterials. In *Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 2232-41. Goa, India.

De Gennaro V., Sorgi C., Delage P. (2005). Air-Water Interaction and Time Dependent Compressibility of a Subterranean Quarry Chalk. In *Proceedings of the Symposium Post Mining 2005*, NC. Nancy, France.

Dehoff R.T. (1991). A geometrically general-theory of diffusion controlled coarsening. *Acta Metallurgica et Materialia* 39 (10), 2349-60.

Delage P., Cui Y.J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur Géotechnique* TIB238DUO (c301), 1-20.

Delage P., Cui Y.J., Schroeder C. (1996). Subsidence and Capillary Effects in Chalks. In *Proceedings of the ISRM International Symposium on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering (EUROCK 96)*, 1291-99. Turin, Italy.

Desai C.S., Siriwardane H.J. (1984). *Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geologic materials*. Prentice-Hall.

Di Maggio F.L., Sandler I.V. (1971). Material model for granular soils. *Journal of Engineering Mechanics* 97, 935-50.

- Djebbi M. (1984). *Phénomène de dissolution-cristallisation: étude bibliographique et application au fluage de craie*. Thèse de 3e cycle, Université Lille 1 - Sciences et technologies.
- Dolarevic S., Ibrahimbegovic A. (2007). A modified three-surface elasto-plastic cap model and its numerical implementation. *Computers & Structures* 85 (7-8), 419-30.
- Drucker D., Prager W. (1952). Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. *Quarterly of Applied Mathematics* 10 (2), 157-65.
- Drucker D.C., Gibson R.E., Henkel D.J. (1957). Soil mechanics and work hardening theories of plasticity. *Trans. ASCE* 122, 338-46.
- Duperret A., Taibi S., Mortimore R.N., Daigneault M. (2005). Effect of Groundwater and Sea Weathering Cycles on the Strength of Chalk Rock from Unstable Coastal Cliffs of NW France. *Engineering Geology* 78 (3-4), 321-43.
- Elmi S., Babin C. (2006). *Histoire de la Terre - 5ème édition*. Dunod.
- Evans B., Bernabé Y., Zhu W. (1999). Evolution of Pore Structure and Permeability of Rocks in Laboratory Experiments. In *Growth, Dissolution and Pattern Formation in Geosystems*, 327-44.
- Fabricius I.L. (2007). Chalk: Composition, Diagenesis and Physical Properties. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 55, 97-128.
- Fayolle B., Verdu J. (2005). Vieillessement physique des matériaux polymères. *Techniques de l'ingénieur Matériaux TIB373DUO (cor108)*, 1-19.
- Filliat G. (1981). *La pratique des sols et fondations*. Moniteur.
- Fossum A.F., Fredrich J.T. (2000). Cap Plasticity Models and Compactive and Dilatant Pre-Failure Deformation. American Rock Mechanics Association.
- Foucault A., Raoult J.-F. (2010). *Dictionnaire de Géologie - 7e édition*. Dunod.
- Funcken L., Welter P. (1996). Procès verbal - Stabilité de la carrière de la Malogne (Mons, Belgique).
- Gaviglio P., Bekri S., Vandycke S., Adler P.M., Schroeder C., Bergerat F., Darquennes A., Coulon M. (2009). Faulting and Deformation in Chalk. *Journal of Structural Geology* 31 (2), 194-207.
- Gennaro M., Wonham J.P., Gawthorpe R., Saelen G. (2013). Seismic Stratigraphy of the Chalk Group in the Norwegian Central Graben, North Sea. *Marine and Petroleum Geology* 45, 236-66.

Ghoreychi M. (1983). *Stabilité d'exploitations partielles avec piliers en état post rupture: application au cas des carrières souterraines de craie*. Thèse de docteur-ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Gökceoğlu C., Ulusay R., Sönmez H. (2000). Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology* 57 (3-4), 215-37.

Gombert P. (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. (2012). Opérations réalisées en 2012 sur les sites des carrières souterraines d'Estreux (Nord) et de Saint-Martin-le-Noeud (Oise) dans le cadre du programme EAT-DRS-02. INERIS - DRS-12-126063-09309A.

Gombert P. (2014). Bilan des études et travaux réalisés dans les carrières souterraines de craie de St-Martin-le-Noeud (60) et d'Estreux (59). Programme EAT-DRS-02. INERIS - DRS-14-14187611991A.

Gombert P., Cherkaoui A. (2011). Analyse climatologique, hydrologique et hydrogéologique des effondrements survenus à Château-Landon (77) aux XIXe et XXe siècles. INERIS - DRS-11-117680-00812A.

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 Joseph Fourier, Grenoble.

Grgic D. (2001). *Modélisation du comportement à court et à long terme des roches de la formation ferrifère lorraine*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine.

Grgic D., Giraud A., Auvray C. (2013). Impact of Chemical Weathering on Micro/macro-Mechanical Properties of Oolitic Iron Ore. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 64, 236-45.

Grgic D., Homand F., Dagallier G. (2001). Ageing of Lorraine (France) Abandoned Iron Mines. In *Proceedings of the ISRM Reg EUROCK Symposium on Rock Mechanics: A Challenge for Society (EUROCK 2001)*, 825-30. Espoo, Finland.

Grgic D., Homand F., Hoxha D. (2002). Influence du vieillissement et de l'eau sur le comportement mécanique des mines de fer abandonnées de Lorraine. *Revue française de génie civil* 6 (6), 1-16.

Grueschow E., Rudnicki J.W. (2005). Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone. *International Journal of Solids and Structures* 42 (16-17), 4574-87.

Guillon T. (2011). *Comportement hydromécanique des argilites du Callovo-Oxfordien lors de cycles de désaturation-resaturation*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Gupta A.S., Rao K.S. (2000). Weathering Effects on the Strength and Deformational Behaviour of Crystalline Rocks under Uniaxial Compression State. *Engineering Geology* 56 (3-4), 257-74.

Gurson A.L. (1977). Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology* 99 (1), 2-15.

Gutierrez M., Oino L.E., Hoeg K. (2000). The Effect of Fluid Content on the Mechanical Behaviour of Fractures in Chalk. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 33 (2), 93-117.

Halsey D.P., Mitchell D.J., Dews S.J. (1998). Influence of Climatically Induced Cycles in Physical Weathering. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 31 (4), 359-67.

Haq B., Hardenbol J., Vail P. (1987). Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic. *Science* 235 (4793), 1156-67.

Heggheim T., Madland M.V., Risnes R., Austad T. (2005). A Chemical Induced Enhanced Weakening of Chalk by Seawater. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 46 (3), 171-84.

Hellmann R., Gaviglio P., Renders P., Gratier J.P., Bekri S., Adler P.M. (2002). Experimental pressure solution compaction of chalk in aqueous solutions. Part 2. Deformation examined by SEM, porosimetry, synthetic permeability, and X-ray computerized tomography. Water-Rock interactions, ores deposits, and Environmental Geochemistry: A Tribute to David A. Crerar. *The Geochemical Society Special publication* 7, 153-78.

Hellmann R., Renders P.J.N., Gratier J.P., Guiguet R. (2002). Experimental pressure solution compaction of chalk in aqueous solutions. Part 1. Deformation behavior and chemistry. Water-Rock interactions, ores deposits, and Environmental Geochemistry: A Tribute to David A. Crerar. *The Geochemical Society Special publication* 7, 129-52.

Henriksen K., Stipp S.L.S., Young J.R., Marsh M.E. (2004). Biological control on calcite crystallization: AFM investigation of coccolith polysaccharide function. *American Mineralogist* 89 (11-12), 1709-16.

- Hickman R.J., Gutierrez M.S. (2007). Formulation of a Three-Dimensional Rate-Dependent Constitutive Model for Chalk and Porous Rocks. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 31 (4), 583-605.
- Hjuler M.L., Fabricius I.L. (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 and Engineering* 68 (3-4), 151-70.
- Homand S. (2000). *Comportement mécanique d'une craie très poreuse avec prise en compte de l'effet de l'eau: de l'expérience à la simulation*. Thèse de doctorat, Université Lille 1 - Sciences et technologies.
- Homand S., Shao J.F. (2000). Mechanical Behaviour of a Porous Chalk and Effect of Saturating Fluid. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* 5 (7), 583-606.
- Homand S., Shao J.F. (2000a). Mechanical Behaviour of a Porous Chalk and Water/chalk Interaction Part I: Experimental Study. *Oil & Gas Science and Technology-Revue D Ifp Energies Nouvelles* 55 (6), 591-98.
- Homand S., Shao J.F. (2000b). Mechanical Behaviour of a Porous Chalk and Water/chalk Interaction Part II: Numerical Modelling. *Oil & Gas Science and Technology-Revue D Ifp Energies Nouvelles* 55 (6), 599-609.
- Homand S., Shao J.F. (2000c). Mechanical Behaviour of a Porous Chalk and Effect of Saturating Fluid. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* 5 (7), 583-606.
- Homand S., Shao J.F., Schroeder C. (1998). Plastic Modelling Of Compressible Porous Chalk and Effect of Water Injection. Society of Petroleum Engineers.
- Homand, Duffaut P., (Collectif). (2000). *Manuel de mécanique des roches*. Vol. 1. Presses des MINES.
- Hsu S., Su C.-H., Chiu I.-M. (2009). A Novel Approach to Align Adult Neural Stem Cells on Micropatterned Conduits for Peripheral Nerve Regeneration: A Feasibility Study. *Artificial Organs* 33 (1), 26-35.
- Jang W., Drelich J., Miller J. (1995). Wetting Characteristics and Stability of Langmuir-Blodgett Carboxylate Monolayers at the Surfaces of Calcite and Fluorite. *Langmuir* 11 (9), 3491-99.
- Jannot Y. (2008). *Isothermes de sorption: modèles et détermination*. Fiche technique.
- Jeannette D. (2000). Originalité des mécanismes d'altération sur les vestiges archéologiques de Délos (Cyclades, Grèce). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 330 (10), 683-88.

- Jones M.E., Leddra M.J. (1989). Compaction and Flow characteristics of porous chalks. In *CFMR - Journée Craie*. Lille, France.
- Josa A., Alonso E.E., Gens A., Lloret A. (1987). Stress-strain behaviour of partially saturated soils. In *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2:561-64. Dublin, Ireland.
- Korsnes R.I., Wersland E., Austad T., Madland M.V. (2008). Anisotropy in Chalk Studied by Rock Mechanics. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 62 (1-2), 28-35.
- Lecarme L., Tekog̃lu C., Pardoën T. (2011). Void growth and coalescence in ductile solids with stage III and stage IV strain hardening. *International Journal of Plasticity* 27 (8), 1203-23.
- Lemaitre J., Chaboche J.-L., Benallal A., Desmorat R. (2009). *Mécanique des matériaux solides - 3ème édition*. Dunod.
- Lifshitz I.M., Slyozov V.V. (1961). The Kinetics of Precipitation from Supersaturated Solid Solutions. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 19 (1-2), 35-50.
- Lord J.A. (1994). *Foundations in Chalk*. CIRIA.
- Lord J.A., Clayton C.R.I., Mortimore R.N. (2002). *Engineering in Chalk*. CIRIA.
- Madland M.V., Hiorth A., Omdal E., Megawati M., Hildebrand-Habel T., Korsnes R.I., Evje S., Cathles L.M. (2011). Chemical Alterations Induced by Rock-Fluid Interactions When Injecting Brines in High Porosity Chalks. *Transport in Porous Media* 87 (3), 679-702.
- Maranini E., Brignoli M. (1998). An Analytical Viscoplastic Model for the Creep Behaviour of a Porous Weak Rock. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils - Soft Rocks. Geotechnics of Hard Soils - Soft Rocks*, 697-705. Naples, Italy.
- Maranini E., Brignoli M. (1999). Creep Behaviour of a Weak Rock: Experimental Characterization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36 (1), 127-38.
- Marsh M.E. (2003). Regulation of CaCO₃ formation in coccolithophores. Comparative Biochemistry and Physiology. Part B. *Biochemistry & Molecular Biology* 136 (4), 743-54.
- Marsh M.E., Ridall A.L., Azadi P., Duke P.J. (2002). Galacturmannan and Golgi-derived membrane linked to growth and shaping of biogenic calcite. *Journal of Structural Biology* 139, 39-45.

Mary A., Mary A. (1907). *Notes pour servir à l'étude hydrogéologique et spéléologique du soulèvement du Bray et des accidents synchroniques, 2e tirage, revu et augmenté d'une introduction des auteurs et d'un exposé de la structure géologique du Bray, extrait d'une préface écrite pour un ouvrage inédit des auteurs sur la région de Saint-Martin-le-Noeud*. Paris, France: J. Rousset.

Masuda K. (2001). Effects of Water on Rock Strength in a Brittle Regime. *Journal of Structural Geology* 23 (11), 1653-57.

Mata C. (2001). *Etude expérimentale et modélisation mécanique des effets du balayage à l'eau dans une craie saturée d'huile: application à l'industrie pétrolière*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Matthews M.C., Clayton C.R.I. (1993). Influence of intact porosity on the engineering properties of a weak rock. In *Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks. International Symposium*, 693-702.

Maury V., Piau J.-M., Halle G. (1996). Subsidence Induced By Water Injection In Water Sensitive Reservoir Rocks : The Example Of Ekofisk. Society of Petroleum Engineers.

McNaught A.D., Wilkinson A. (1997). *Compendium of Chemical Terminology: IUPAC Recommendations*. Blackwell Science. <http://goldbook.iupac.org/>.

Megawati M., Hiorth A., Madland M.V. (2013). The Impact of Surface Charge on the Mechanical Behavior of High-Porosity Chalk. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46 (5), 1073-90.

Megawati M., Madland M.V., Hiorth A. (2012). Probing Pore Characteristics of Deformed Chalk by NMR Relaxation. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 100, 123-30.

Meyer H.J. (1984). The influence of impurities on the growth rate of calcite. *Journal of Crystal Growth* 66, 639-46.

Mobarek H. (2013). Argiles de Béjaia : Succions et changement de volumes. In *21ème Congrès Français de Mécanique*, 1-7. Bordeaux, France.

Monchiet V., Cazacu O., Charkaluk E., Kondo D. (2008). Macroscopic yield criteria for plastic anisotropic materials containing spheroidal voids. *International Journal of Plasticity* 24 (7), 1158-89.

Monjoie A., Schroeder C. (1989). Caractéristiques mécaniques de craies du Crétacé Supérieur. In *CFMR - Journée Craie*. Lille, France.

- Monjoie A., Schroeder C. (1996). Déplacements des hydrocarbures dans la craie. In *Colloque « La Craie, Objet Géologique, Réservoir, Matériau et Paysage »*. Arras, France.
- Monjoie A., Schroeder C., Da Silva F., Debande G., Detiege C., Poot B. (1985). Characterisation and Inhibition of Chalks. In *Proceedings of the 2nd North Sea Chalk Symposium*. Stavanger, Norway.
- Monjoie A., Schroeder C., Prignon C., Yernaux C., Da Silva F., Debande G. (1990). Establishment of constitutive laws of Chalk and long term tests. In *Proceedings of the 3rd North Sea Chalk Symposium*. Copenhagen, Denmark.
- Morse J.W., Arvidson R.S., Luttge A. (2007). Calcium Carbonate Formation and Dissolution. *Chemical Reviews* 107 (2), 342-81.
- Morse J.W., Casey W.H. (1988). Ostwald Processes and Mineral Paragenesis in Sediments. *American Journal of Science* 288 (6), 537-60.
- Mortimore R.N. (1989). Chalk or Kalk? In *Proceedings of the International Chalk Symposium*, 15-45. Brighton, England.
- Mortimore R.N. (2012). Making Sense of Chalk: A Total-Rock Approach to Its Engineering Geology. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 45 (3), 252-334.
- Mortimore R.N., Fielding P.M. (1989). The Relationship Between Texture, Density and Strength of Chalk. In *Proceedings of the International Chalk Symposium*, 109-32. Brighton, England.
- Mroginiski J.L., Etse G., Vrech S.M. (2011). A thermodynamical gradient theory for deformation and strain localization of porous media. *International Journal of Plasticity* 27 (4), 620-34.
- 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 and Mining Sciences* 58, 149-65.
- Newman G. (1983). The Effect of Water Chemistry on the Laboratory Compression and Permeability Characteristics of Some North-Sea Chalks. *Journal of Petroleum Technology* 35 (5), 976-80.
- NF EN ISO 483. Petites enceintes de conditionnement et d'essai utilisant des solutions aqueuses pour maintenir l'humidité relative à une valeur constante. AFNOR 1999.
- NF P 94-048. Sols - Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre. AFNOR 2003.

NF P 94-410-1. Roches - Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches. Partie 1 - Détermination de la teneur en eau pondérale - Méthode par étuvage. AFNOR 2001.

NF P 94-410-2. Roches - Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches. Partie 2 - Détermination de la masse volumique - Méthode géométrique et par immersion dans l'eau. AFNOR 2001.

NF P 94-411. Roches - Détermination de la vitesse des ondes ultrasonores en laboratoire - Méthode par transparence. AFNOR 2002.

NF P 94-420. Roches - Détermination de la résistance à la compression uniaxiale. AFNOR 2000.

NF P 94-422. Roches - Détermination de la résistance à la traction - Méthode indirecte - Essai brésilien. AFNOR 2001.

NF P 94-423. Roches - Détermination de la résistance à la compression triaxiale. AFNOR 2002.

NF P 94-425. Roches - Détermination du module de Young et du coefficient de Poisson. AFNOR 2002.

NF X 15-119. Mesure de l'humidité de l'air. Générateurs d'air humide à solutions salines pour l'étalonnage des hygromètres. AFNOR 1999.

Nguyen H.D. (2009). *Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées.

Nguyen H.D., De Gennaro V., Delage P., Sorgi C. (2008). Retention and Compressibility Properties of a Partially Saturated Mine Chalk. In *Proceedings of the 1st European Conference on Unsaturated Soils*, 283-89. Durham, England:

Nowamooz H. (2007). *Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.

Nye J.F. (1985). *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. Clarendon Press.

Okhrimenko D.V., Dalby K.N., Skovbjerg L.L., Bovet N., Christensen J.H., Stipp S.L.S. (2014). The Surface Reactivity of Chalk (biogenic Calcite) with Hydrophilic and Hydrophobic Functional Groups. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 128, 212-24.

Ostwald W. (1897). Studien über die Bildung und Umwandlung fester Körper (Studies on the formation and transformation of solid bodies). In *Zeitschrift für physikalische Chemie*, (22) 289-330. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig.

- Oyama T., Chigira M. (2000). Weathering Rate of Mudstone and Tuff on Old Unlined Tunnel Walls. *Engineering Geology* 55 (1-2), 15-27.
- Pachon-Rodriguez E.-A. (2011). *Étude de l'influence de la dissolution sous contrainte sur les propriétés mécaniques des solides: fluage du plâtre*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard.
- Papamichos E., Brignoli M., Santarelli F.J. (1997). An Experimental and Theoretical Study of a Partially Saturated Collapsible Rock. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* 2 (3), 251-78.
- Parsegian V.A. (2005). *Van Der Waals Forces: A Handbook for Biologists, Chemists, Engineers, and Physicists*. Cambridge University Press.
- Piau J.M., Maury V. (1995). *Basic Mechanical Modelisation of Chalk/water Interaction*. Rotterdam: A a Balkema.
- Pietruszczak S., Lydzba D., Shao J.F. (2004). Description of Creep in Inherently Anisotropic Frictional Materials. *Journal of Engineering Mechanics* 130 (6), 681-90.
- Plischke B. (1996). Some aspect of numerical simulation of water-induced chalk compaction. In *Proceedings of the 5th North Sea Chalk Symposium*. Reims, France.
- Plummer L.N., Wigley T.M.L., Parkhurst D.L. (1978). The Kinetics of Calcite Dissolution in CO₂-Water Systems at 5 Degrees to 60 Degrees C and 0.0 to 1.0 Atm CO₂. *American Journal of Science* 278 (2), 179-216.
- Priol G. (2005). *Comportement mécanique différé et mouillabilité d'une craie pétrolifère*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Priol G., De Gennaro V., Delage P., Hernandis J.V.C. (2004). Influence des fluides sur le comportement différé de la craie. In *XXIe Rencontres Universitaires de Génie-Civil*.
- Priol G., De Gennaro V., Delage P., Servant T. (2007). Experimental Investigation on the Time Dependent Behaviour of a Multiphase Chalk. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanics of Unsaturated Soil*, (112) 161-67. Weimar, Germany.
- Quang H.L., He Q.-C. (2008). Variational principles and bounds for elastic inhomogeneous materials with coherent imperfect interfaces. *Mechanics of Materials* 40 (10), 865-84.
- Radi E., Bigoni D., Loret B. (2002). Steady crack growth in elastic-plastic fluid-saturated porous media. *International Journal of Plasticity* 18 (3), 345-58.
- Raffoux J.F., Ervel C. (1980). Stabilité générale de la carrière souterraine d'Estreux. Rapport CERCHAR.

Ramana Y.V., Gogte B.S. (1982). Quantitative studies of weathering in saprolized charnockites associated with a landslip zone at the Porthimund dam, India. *Engineering Geology* 19, 29-46.

Ratke L., Voorhees P.W. (2002). *Growth and Coarsening: Ostwald Ripening in Material Processing*. Springer Science & Business Media.

Reeves D., Rothman D.H. (2013). Age Dependence of Mineral Dissolution and Precipitation Rates. *Global Biogeochemical Cycles* 27 (3), 906-19.

Richard J. (2008). Mass Transfers and Volume Changes Related to Pressure Solution-Fracturing Interactions in Carbonate Rocks: Example of the Oligocene Deformation of the Coniacian Chalk from the Omev Area (Paris Basin, France). *Journal of Structural Geology* 30 (10), 1300-1313.

Risnes R., Flaageng O. (1999). Mechanical Properties of Chalk with Emphasis on Chalk-Fluid Interactions and Micromechanical Aspects. *Oil & Gas Science and Technology-Revue D Ifp Energies Nouvelles* 54 (6), 751-58.

Risnes R., Gjesdal S., Landaas T., Madland I. (1994). Changes in Mechanical-Properties of Chalk Caused by Deformation and by Pore Pressure. In *Proceedings of the 2nd Joint SPE/ISRM Rock Mechanics Conference: Rock Mechanics in Petroleum Engineering (EUROCK 94)*, 853-60. Delft, Netherlands.

Risnes R., Haghghi H., Korsnes R.I., Natvik O. (2003). Chalk-Fluid Interactions with Glycol and Brines. *Tectonophysics* 370 (1-4), 213-26.

Risnes R., Madland M.V., Hole M., Kwabiah N.K. (2005). Water Weakening of Chalk - Mechanical Effects of Water-Glycol Mixtures. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 48 (1-2), 21-36.

Robinson D.A., Woodun J.K. (2008). An Experimental Study of Crust Development on Chalk Downland Soils and Their Impact on Runoff and Erosion. *European Journal of Soil Science* 59 (4), 784-98.

Roziere E. (2007). *Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.

Sandler I.S., Rubin D. (1979). An Algorithm and a Modular Subroutine for the CAP Model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 3 (2), 173-86.

Schmitt J.H., Shen E.L., Raphanel J.L. (1994). A parameter for measuring the magnitude of a change of strain path: Validation and comparison with experiments on low carbon steel. *International Journal of Plasticity* 10 (5), 535-51.

Schofield A.N., Wroth P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill.

- Scholle P.A. (1977). Chalk Diagenesis and Its Relation to Petroleum Exploration: Oil from Chalk, a Modern Miracle? *Bulletin of the American Society of Petroleum Geologists* 61 (7), 982-1009.
- Schroeder C. (1995). Le « Pore-Collapse »: aspect particulier de l'interaction fluide-squelette dans les craies? In *Colloque international « Craies et Schistes »*. Bruxelles, Belgium.
- Schroeder C. (2002). *Du coccolithe au réservoir pétrolier: approche phénoménologique du comportement mécanique de la craie en vue de sa modélisation à différentes échelles*. Thèse de sciences appliquées, Université de Liège.
- Schroeder C. (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).
- Schroeder C., Shao J.F. (1996). Plastic deformation and capillary effects in chalks. In *Proceedings of the 5th North Sea Chalk Symposium*. Reims, France.
- Seifert T., Schmidt I. (2009). Plastic yielding in cyclically loaded porous materials. *International Journal of Plasticity* 25 (12), 2435-53.
- Shao J.F., Henry J.P. (1991). Development of an elastoplastic model for porous rock. *International Journal of Plasticity* 7 (1-2), 1-13.
- Simo J.C., Kennedy J.G., Govindjee S. (1988). Non-Smooth Multisurface Plasticity and Viscoplasticity. Loading/unloading Conditions and Numerical Algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 26 (10), 2161-85.
- Siwak J.M. (1994). *Comportement et modélisation de la craie*. Thèse de doctorat, Université Lille 1 - Sciences et technologies.
- Siwak J.M., Pecqueur G., Mikołajczak A. (1994). Behaviour of Chalks. In *Proceedings of the 2nd Joint SPE/ISRM Rock Mechanics Conference: Rock Mechanics in Petroleum Engineering (EUROCK 94)*, 861-69. Delft, Netherlands.
- Skoczylas F., Shao J.F. (1998). Experimental study of the poro-mechanical behaviour of a white chalk. *Bulletin De La Societe Geologique De France* 169 (1), 91-99.
- Skovbjerg L.L., Hassenkam T., Makovicky E., Hem C.P., Yang M., Bovet N., Stipp S.L.S. (2012). Nano Sized Clay Detected on Chalk Particle Surfaces. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 99, 57-70.

Skovbjerg L.L., Okhrimenko D.V., Khoo J., Dalby K.N., Hassenkam T., Makovicky E., Stipp S.L.S. (2013). Preferential Adsorption of Hydrocarbons to Nanometer-Sized Clay on Chalk Particle Surfaces. *Energy & Fuels* 27 (7), 3642-52.

Sorgi C., Auvray C. (2005). Contribution méthodologique et expérimentale à l'étude de la diminution de la résistance des massifs rocheux par vieillissement. In *Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées : séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC*, 124-42. LCPC. Paris.

Sorgi C., De Gennaro V. (2007). ESEM Analysis of Chalk Microstructure Submitted to Hydromechanical Loading. *Comptes Rendus Geoscience* 339 (7), 468-81.

Sorgi C., De Gennaro V. (2011). Water-Rock Interaction Mechanisms and Ageing Processes in Chalk. *Advances in Data, Methods, Models and Their Applications in Geoscience*.

Souley M., Lafrance N., Auvray C., Labiouse V., Belem T. (2016). An elastoplastic and viscoplastic model for highly porous geomaterials: application to two chalks of the Parisian Basin. In *Proceedings of the 2016 ISRM Internatinal Symposium - Rock Mechanics & Rock Engineering: From the Past to the Future (EUROCK'16)*, In Press. Cappadocia, Turquie.

Strand S., Hjuler M.L., Torsvik R., Pedersen J.I., Madland M.V., Austad T. (2007). Wettability of Chalk: Impact of Silica, Clay Content and Mechanical Properties. *Petroleum Geoscience* 13 (1), 69-80.

Swan C.C., Seo Y.K. (2000). *A smooth cap plasticity model for soils: Integration algorithm, parameter estimation and applications*. USA: University of Iowa.

Ta A.N., Tang A.M., Cui Y.J., Mantho A., Cui K. (2008). Propriétés de rétention et de compressibilité d'une argile naturelle gonflante. In *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG'08)*, 619-26. Nantes, France.

Taibi S., Duperret A., Fleureau J.-M. (2009). The Effect of Suction on the Hydro-Mechanical Behaviour of Chalk Rocks. *Engineering Geology* 106 (1-2), 40-50.

Talesnick M., Hatzor Y.H., Tsesarsky M. (2001). The Elastic Deformability and Strength of a High Porosity, Anisotropic Chalk. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 (4), 543-55.

Talesnick M., Shehadeh S. (2007). The Effect of Water Content on the Mechanical Response of a High-Porosity Chalk. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44 (4), 584-600.

Tatsuoka F. (2006). Inelastic Deformation Characteristics of Geomaterial. In *Proceedings of the Geotechnical Symposium Held to Celebrate the 60th Birthday of*

-
- Fumio Tatsuoka. *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*, 146:1-108. Rome, Italie.
- Thomas M., Clouse J., Longo J. (1993). Adsorption of Organic-Compounds on Carbonate Minerals .1. Model Compounds and Their Influence on Mineral Wettability. *Chemical Geology* 109 (1-4), 201-13.
- Vajdova V., Baud P., Wong T. (2004). Compaction, Dilatancy, and Failure in Porous Carbonate Rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109 (B5), B05204.
- Van Eeckhout E.M. (1976). The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 13 (2), 61-67.
- Van Eekelen H. a. M. (1980). Isotropic Yield Surfaces in Three Dimensions for Use in Soil Mechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 4 (1), 89-101.
- Vandycke S. (1992). *Tectonique cassante et paléo-contraintes dans les formations crétacées du nord-ouest européen: implications géodynamiques*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- Voorhees P.W., Glicksman M.E. (1984). Solution to the multi-particle diffusion problem with applications to Ostwald ripening. *Acta Metallurgica* 32 (11), 2001-30.
- Wagner C. (1961). Theorie der Alterung von Niederschlägen durch Umlösen (Ostwald-Reifung) - Theory of the aging of precipitates by dissolution-reprecipitation (Ostwald ripening). *Zeitschrift für Elektrochemie* 65 (7), 581-91.
- Wassermann J. (2006). *Étude expérimentale de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Watelet J.M. (1996). *Méthode d'analyse et diagnostic des conditions de stabilité des carrières souterraines*. Mémoire de fin d'étude. ISAM-SNAM. Paris.
- Wilson M.J. (2013). *Rock-Forming Minerals: Clay Minerals. Sheet Silicates. Volume 3C*. Geological Society of London.
- Wilson M.J., Wilson L., Patey I. (2014). The Influence of Individual Clay Minerals on Formation Damage of Reservoir Sandstones: A Critical Review with Some New Insights. *Clay Minerals* 49 (2), 147-64.
- Wong T., Baud P. (2012). The brittle-ductile transition in porous rock: A review. *Journal of Structural Geology* 44, 25-53.

- Wong T.F., Baud P. (1999). Mechanical Compaction of Porous Sandstone. *Oil & Gas Science and Technology* 54 (6), 715-27.
- Wong T.F., David C., Zhu W. (1997). The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102 (B2), 3009-25.
- Wood D.M. (1990). *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press.
- Xie S.Y. (2005). *Contribution à l'étude du comportement mécanique d'une roche poreuse*. Thèse de doctorat, Université Lille 1 - Sciences et technologies.
- Xie S.Y., Shao J.F. (2006). Elastoplastic Deformation of a Porous Rock and Water Interaction. *International Journal of Plasticity* 22 (12), 2195-2225.
- Xie S.Y., Shao J.F. (2012). Experimental investigation and poroplastic modelling of saturated porous geomaterials. *International Journal of Plasticity* 39, 27-45.
- XP CEN ISO/TS 17892-4. Reconnaissance et essais géotechniques. Essai de sol au laboratoire. Partie 3 - Détermination de la masse volumique des grains – Méthode du pycnomètre. AFNOR 2001.
- Yang R., Gui Q., Lemarchand E., Fen-Chong T., Li K. (2015). Micromechanical Modeling of Transport Properties of Cement-Based Composites: Role of Interfacial Transition Zone and Air Voids. *Transport in Porous Media* 110 (3), 591-611.
- Ziegler P.A. (1990). *Geological Atlas of Western and Central Europe*. Shell Internationale Petroleum Maatschappij, B.V.
- Zohdi T.I., Kachanov M., Sevostianov I. (2002). On perfectly plastic flow in porous material. *International Journal of Plasticity* 18 (12), 1649-59.

Annexes

<i>Annexe</i>	<i>Titre</i>	<i>Pages</i>
Annexe A	Analyse des propriétés trouvées dans la bibliographie	17
Annexe B	Courbes d'essais et résultats – Propriétés physiques et mécaniques CT	42
Annexe C	Courbes d'essais et résultats – Propriétés mécaniques LT	11
Annexe D	Vers la modélisation du comportement mécanique des craies étudiées	17

Annexe A :

Analyse des propriétés trouvées dans la bibliographie

A1.	Récapitulatif des propriétés trouvées dans la bibliographie.....	3
A2.	Corrélation entre les propriétés trouvées dans la bibliographie	7
A3.	Compléments de l'état de l'art	11

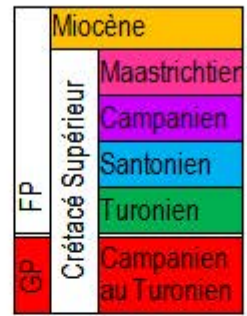
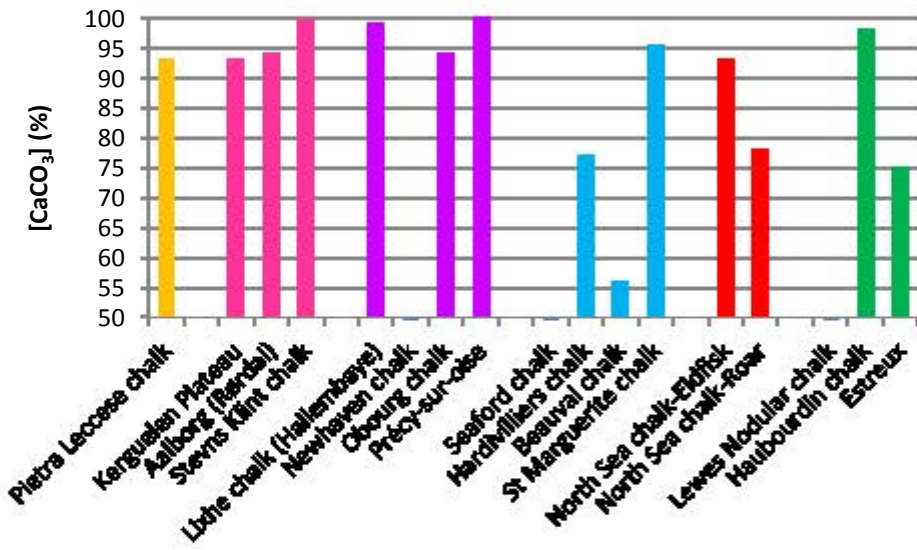
Synthèse de données bibliographiques sur la craie

Légende : ρ_d et ρ_s : masses volumiques respectivement sèche et des grains ; n : porosité connectée (méthode des pesées) ; R_c : résistance en compression uniaxiale ; E : module de Young ; $[CaCO_3]$ et $[SiO_2]$: teneurs respectives de carbonate de calcium et de silice ; En rose : craies profondes de Mer du Nord. * Valeurs moyennes. – la valeur n'a pas été renseignée.

■Références : [a] Brignoli et al. 1994, [b] Maranini et Brignoli 1999, [c] Risnes et al. 2003, [d] Risnes et al. 2005, [e] Heggheim et al. 2005, [f] Hjuler et Fabricius 2009, [g] Nadah et al. 2013, [h] Madland et al. 2011, [i] Madland et al. 2001, [j] Delage et al. 1996, [k] Risnes et Flaageng 1999, [l] Homand et Shao 2000c, [m] Schroeder 2002, [n] De Gennaro et al. 2003, [o] De Gennaro et al. 2004, [p] Monjoie et al. 1990, [q] Duperret et al. 2005, [r] Korsnes et al. 2008, [s] Nguyen 2009, [t] Alam et al. 2012

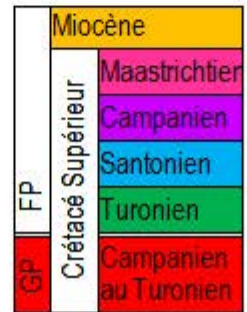
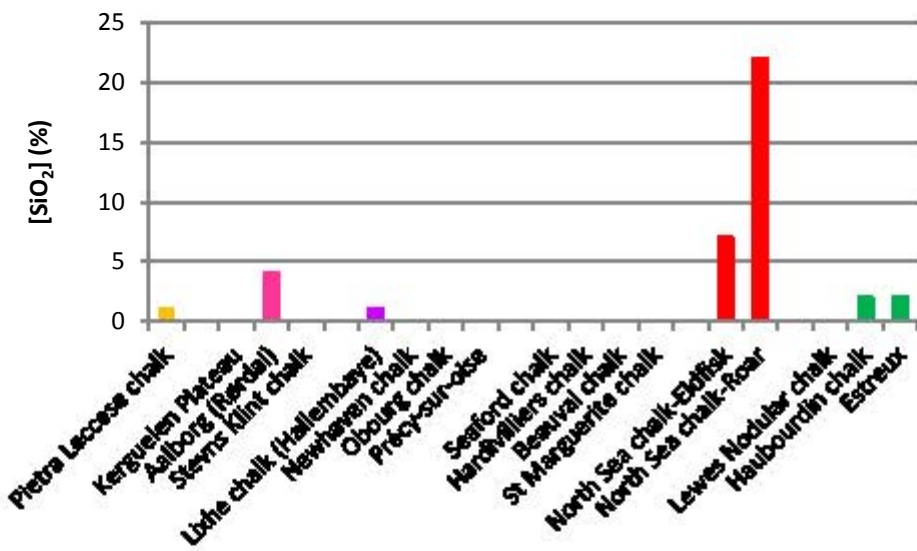
Age géologique	Appellation	ρ_d (g.cm ⁻³)	ρ_s (g.cm ⁻³)	Surface spécifique (m ² .g ⁻¹)	Perméabilité (m ²)	n^* (%)	R_c^* (MPa)	E^* (GPa)	[CaCO ₃] (%)	[SiO ₂] (%)	Réfé [■]	
Miocène	Pietra Leccese chalk	-	2.62	-	6.10 ⁻¹⁵	36	28	24	93	1	[a][b]	
Crétacé supérieur	Maastrichtien	Kerguelen Plateau	2.01	2.72	3.9	-	42	19	-	93	-	[t]
		Aalborg (Rørdal)	1.44	2.72	3.6	4.10 ⁻¹⁵	47	10	-	94	4	[c]
		Stevns Klint chalk	1.29	2.76	1.7	2.10 ⁻¹⁵	47	8.5	-	99.8	-	[e][i]
	Campanien	Lixhe chalk (Hallembaye)	1.19	2.71	9	1.10 ⁻¹⁵	42	6	-	98	2	[j][k][l][m][n][o][c][d][r]
		Newhaven chalk	1.78	-	-	-	34	2.7	0.3	-	-	[q]
		Obourg chalk	1.66	2.72	3.4	2.10 ⁻¹⁵	39	-	-	94	-	[f]
		Précy-sur-oise	1.53	2.69	1.5	7.10 ⁻¹⁵	43	-	-	100	-	[f]
	Santonien	Seaford chalk	1.48	-	-	-	40	3	0.23	-	-	[q]
		Hardivilliers chalk	1.53	2.81	3.2	1.10 ⁻¹⁴	46	-	-	77	-	[f]
		Beauval chalk	1.58	2.91	6.9	3.10 ⁻¹⁴	46	-	-	56	-	[f]
		St Marguerite chalk	1.47	2.73	2.1	7.10 ⁻¹⁵	46	-	-	95.3	-	[f]
	Camp. à Tur.	North Sea chalk-Eldfisk	-	-	-	2.10 ⁻¹⁵	36	-	-	93	7	[p]
		North Sea chalk-Roar	-	-	-	2.10 ⁻¹⁵	48	-	-	78	22	[p]
	Turonien	Lewes Nodular chalk	1.59	-	-	-	41	3.9	0.4	-	-	[q]
Haubourdin chalk		1.57	2.77	-	2.10 ⁻¹⁵	42	14.7	10	98	<2	[g]	
Estreux		1.73	2.74	14	-	37	10.3	2.83	75	2	[s]	

A1. Récapitulatif des propriétés trouvées dans la bibliographie



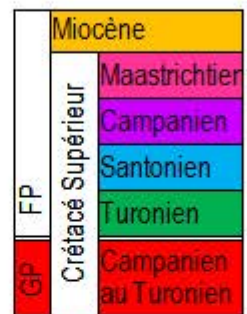
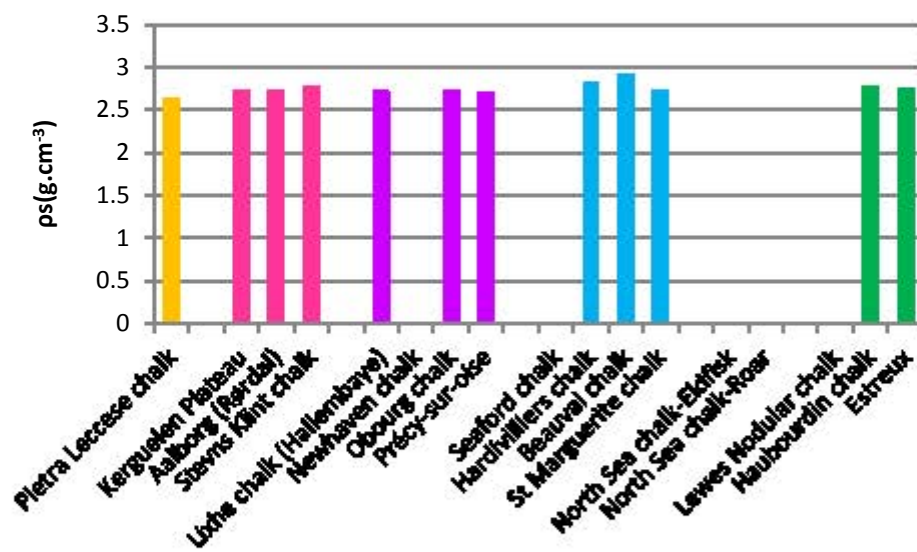
FP : faible profondeur

GP : grande profondeur



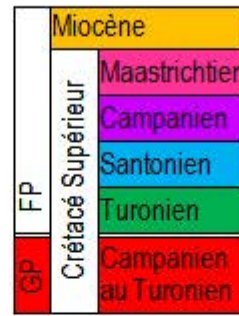
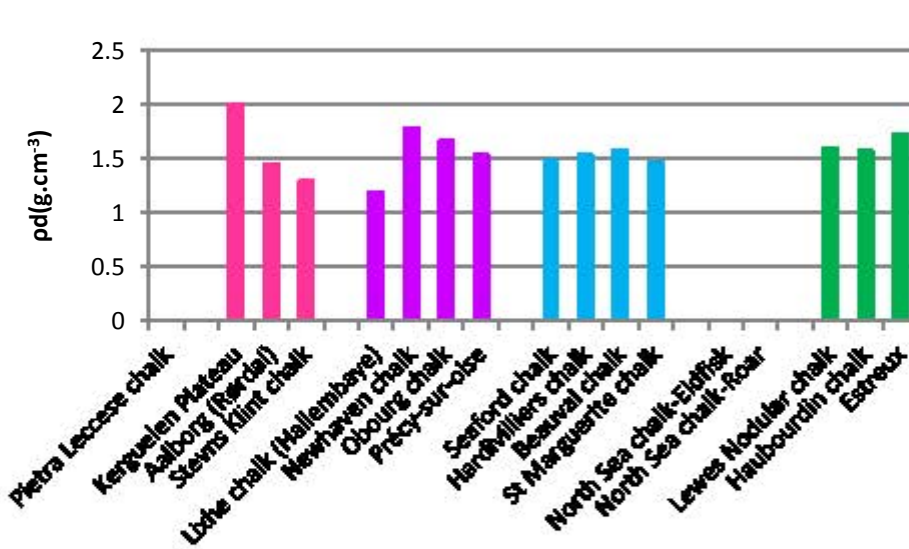
FP : faible profondeur

GP : grande profondeur



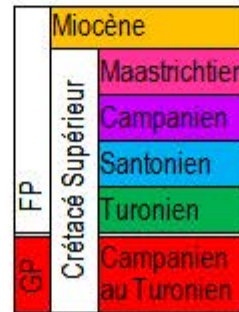
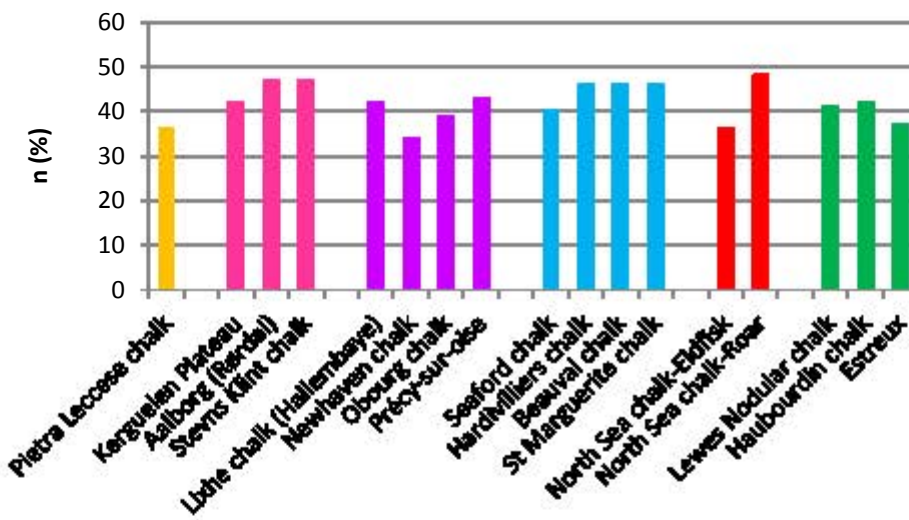
FP : faible profondeur

GP : grande profondeur



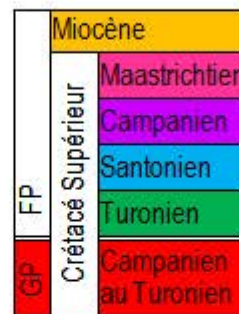
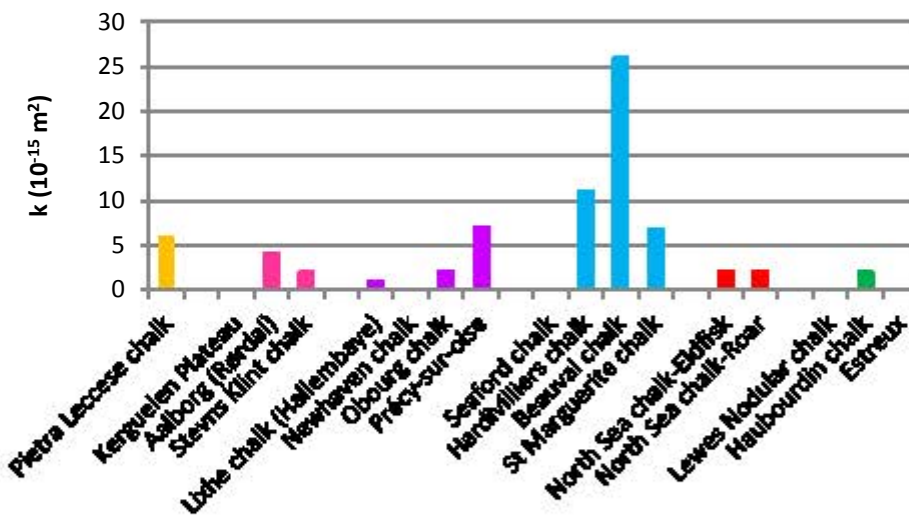
FP : faible profondeur

GP : grande profondeur



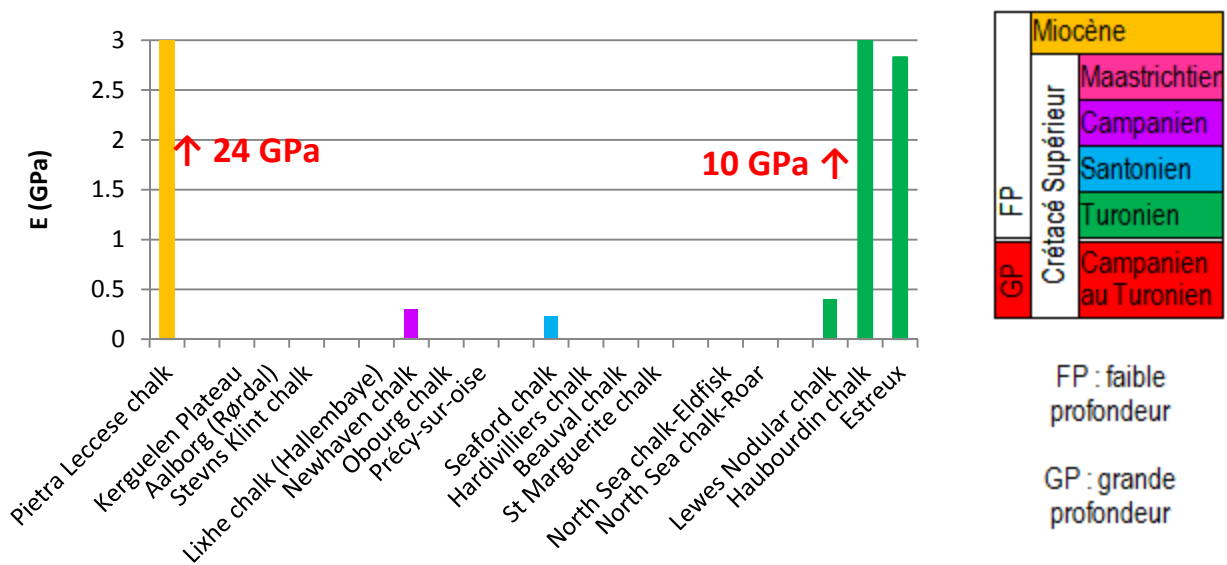
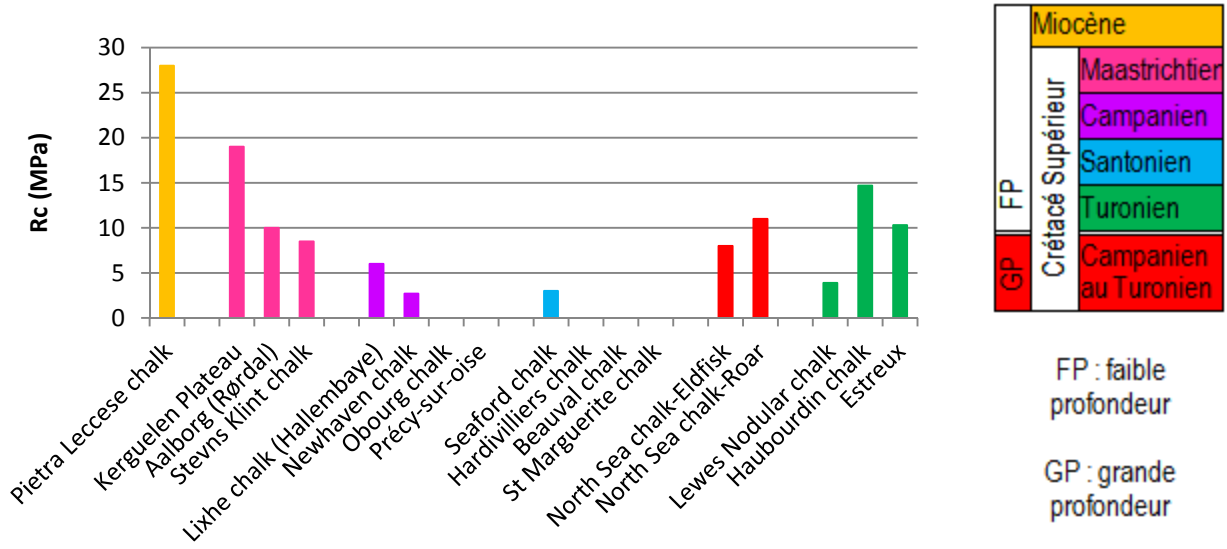
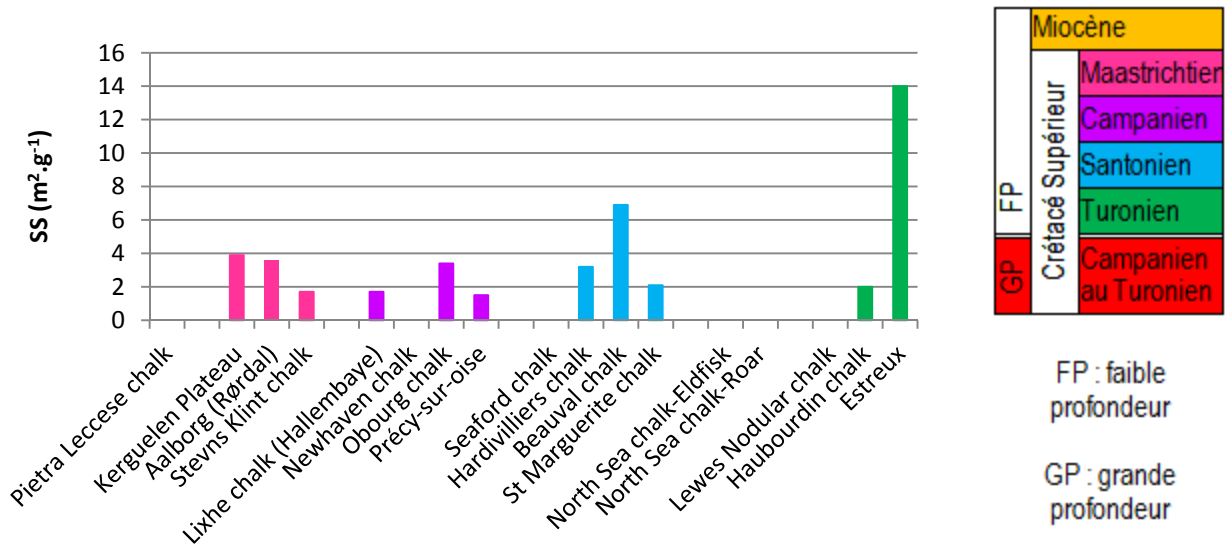
FP : faible profondeur

GP : grande profondeur



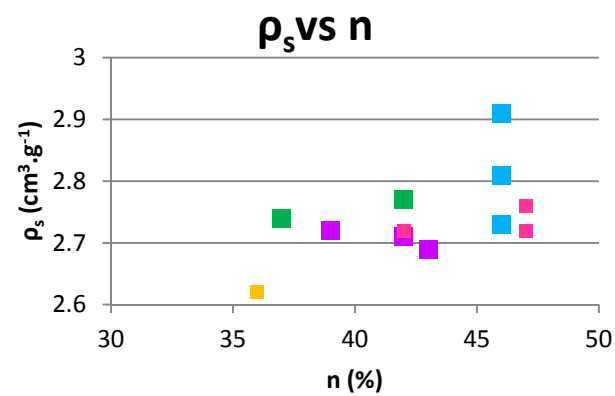
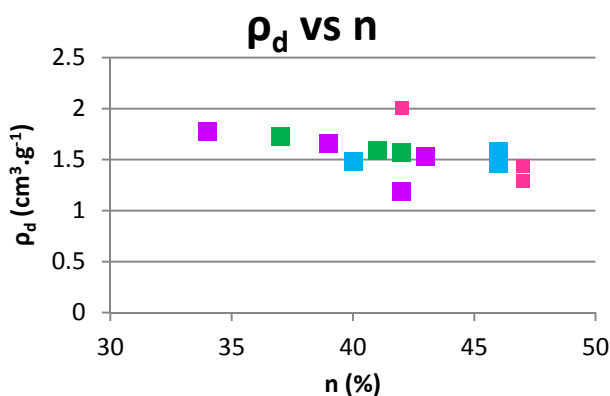
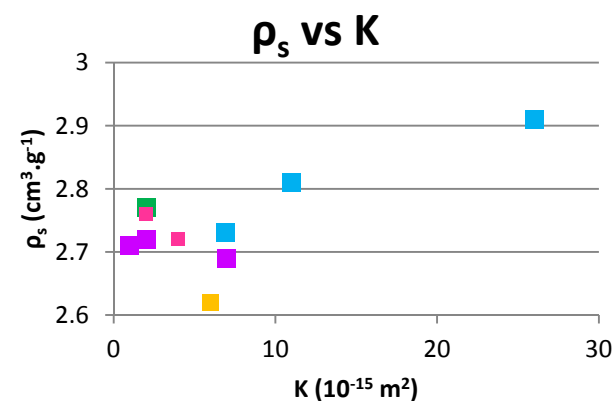
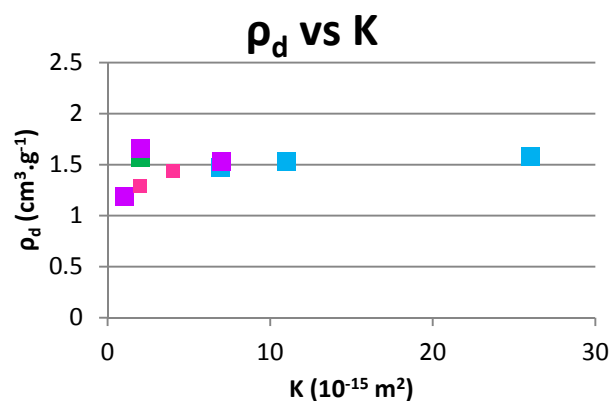
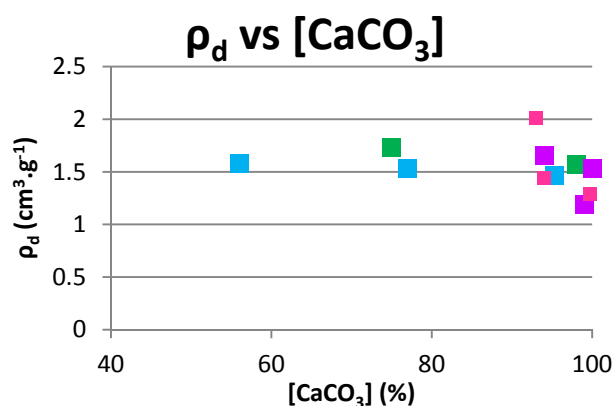
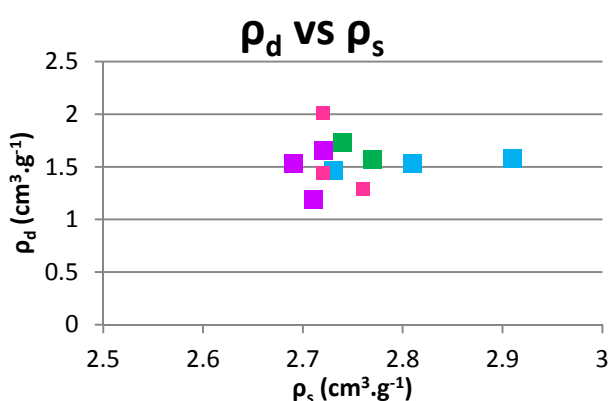
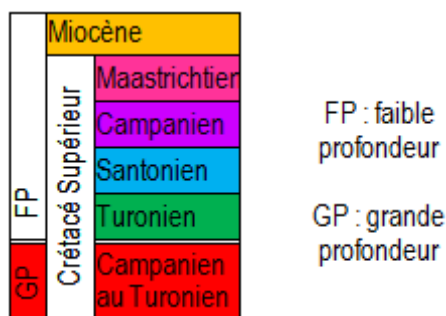
FP : faible profondeur

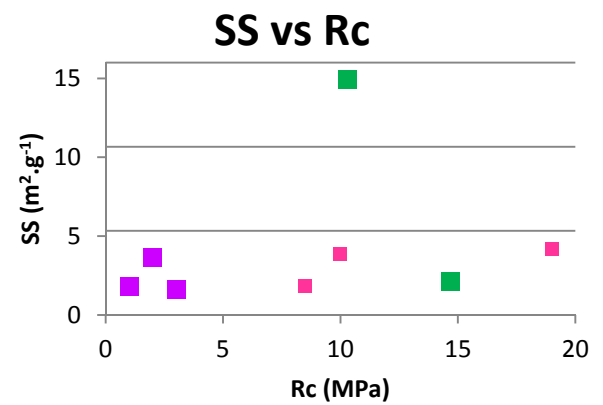
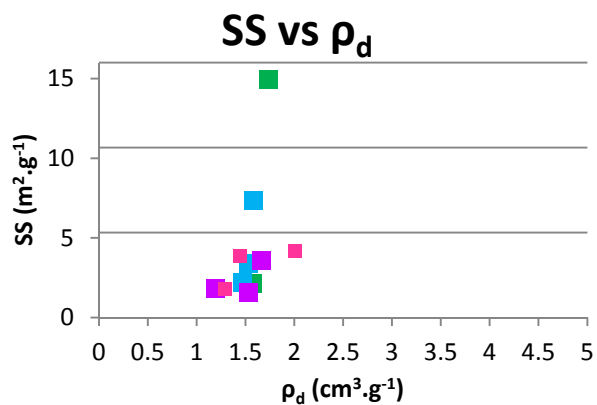
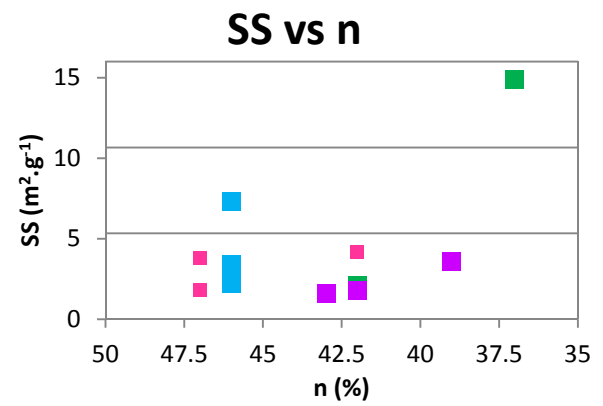
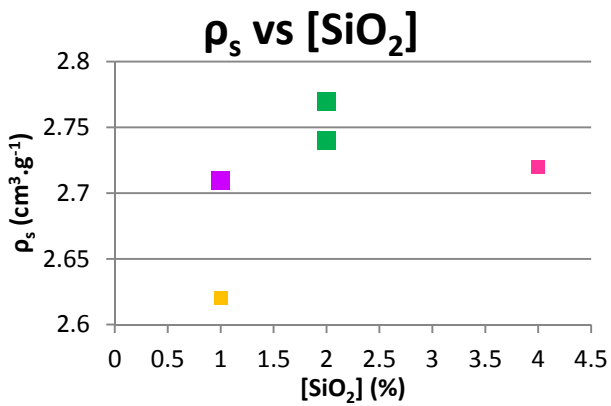
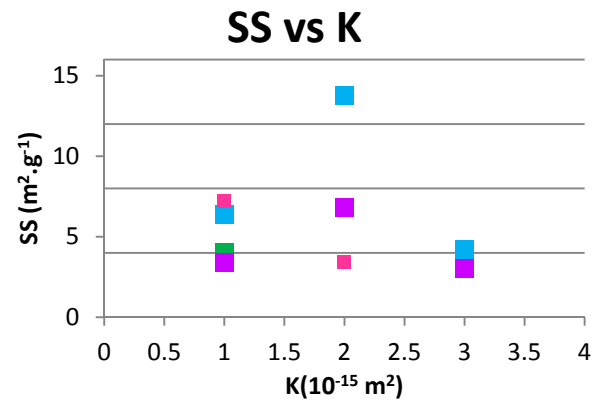
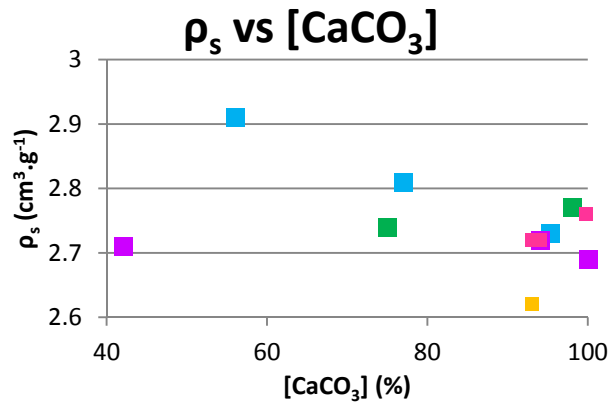
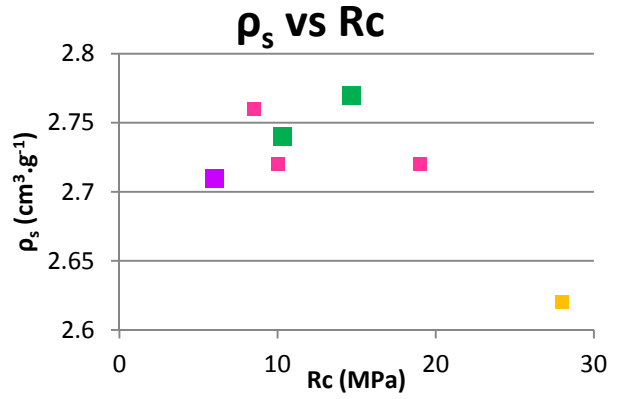
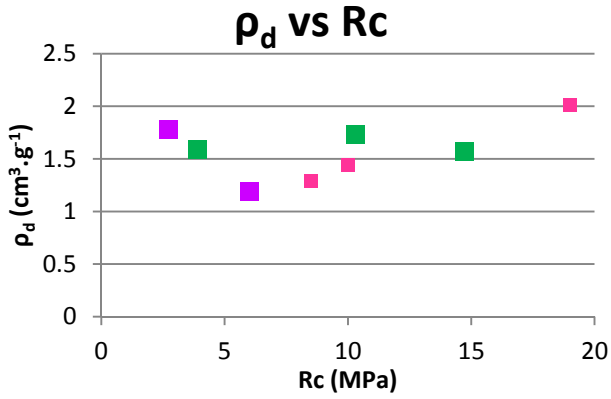
GP : grande profondeur

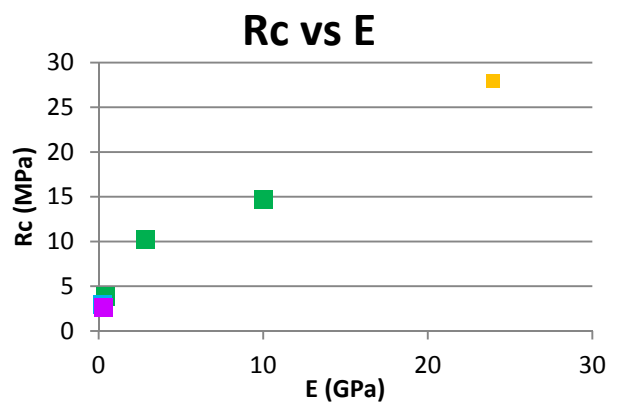
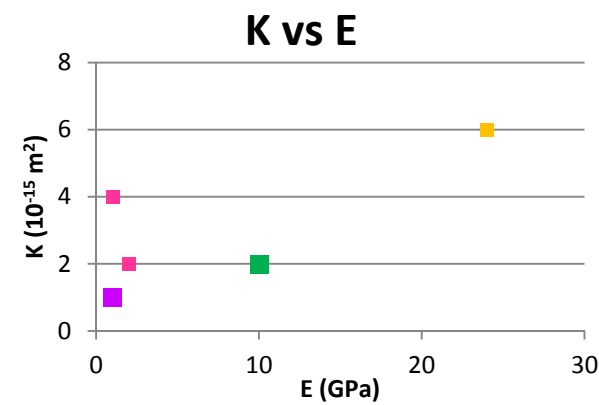
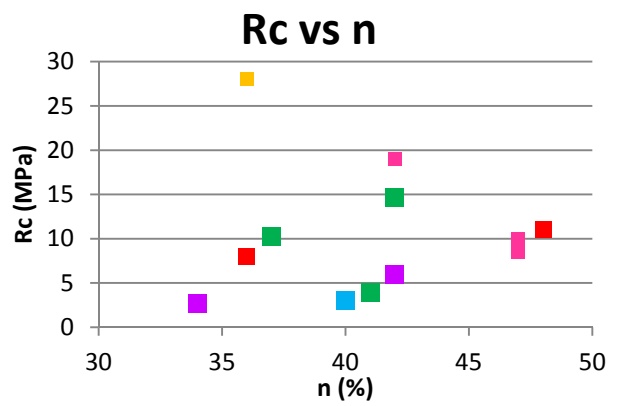
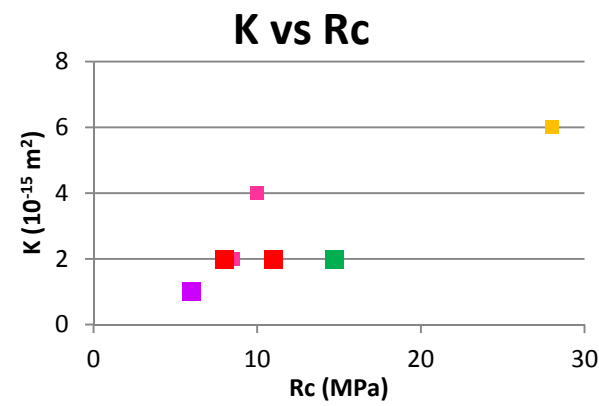
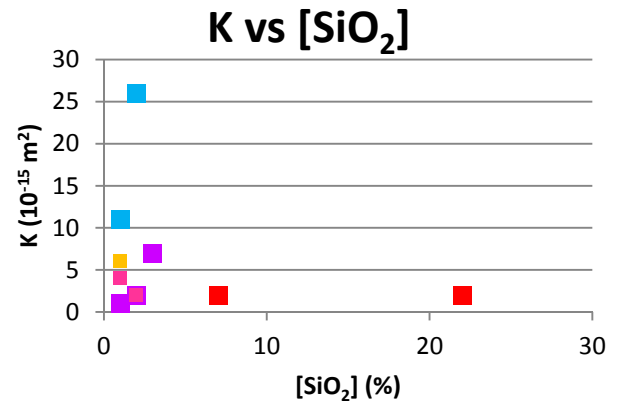
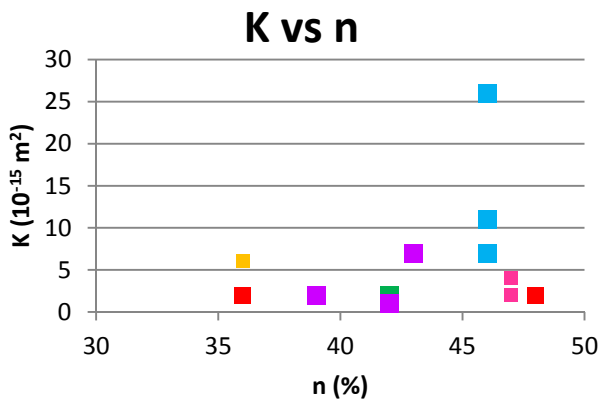
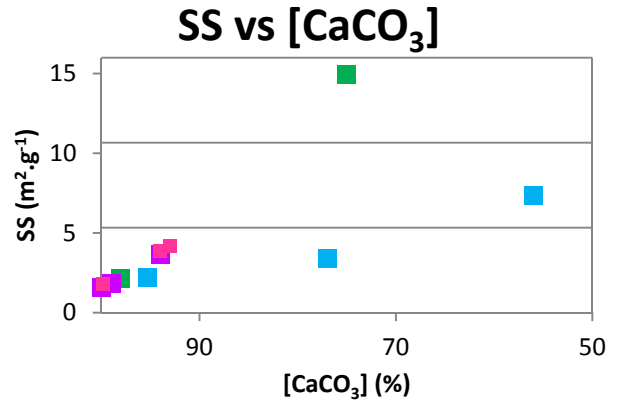
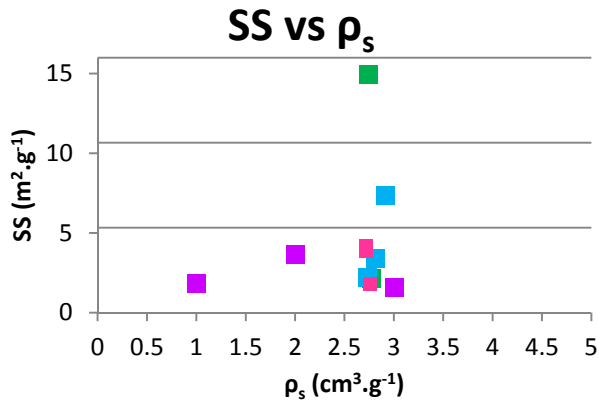


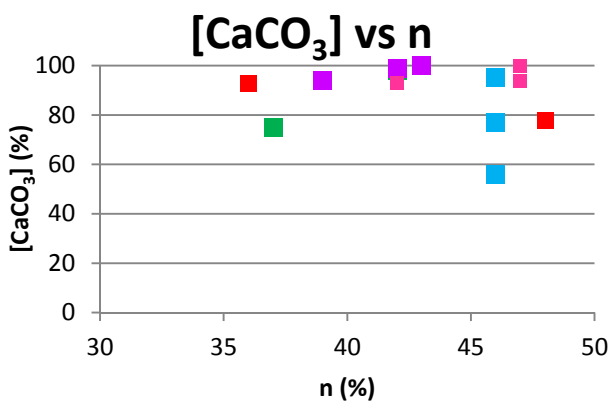
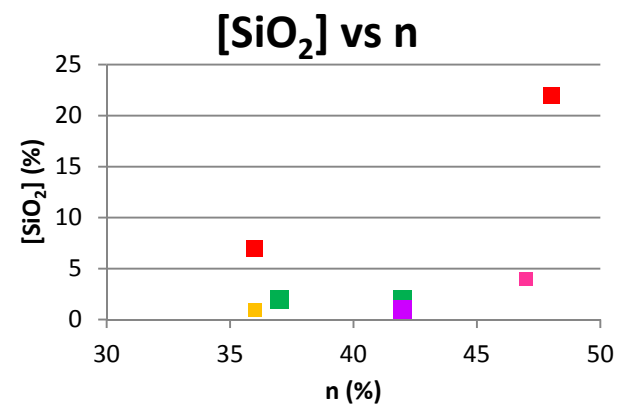
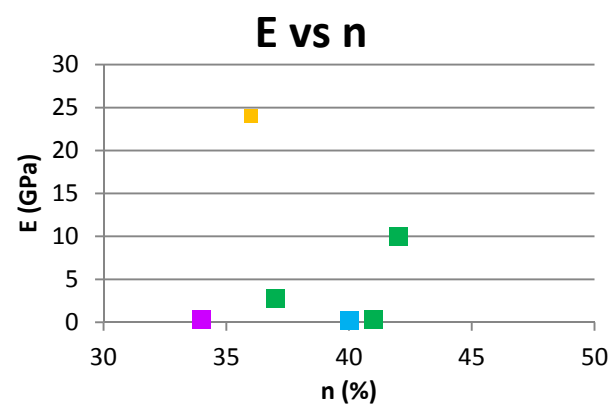
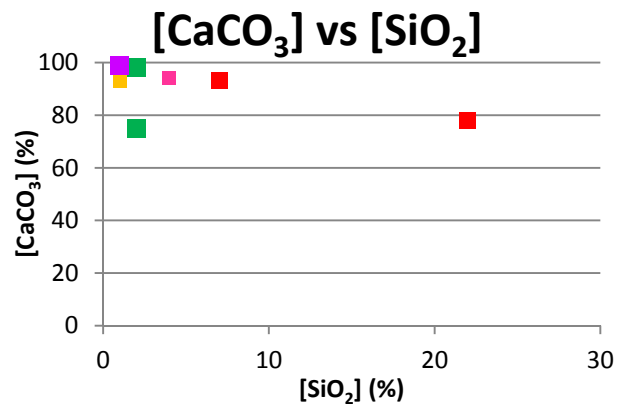
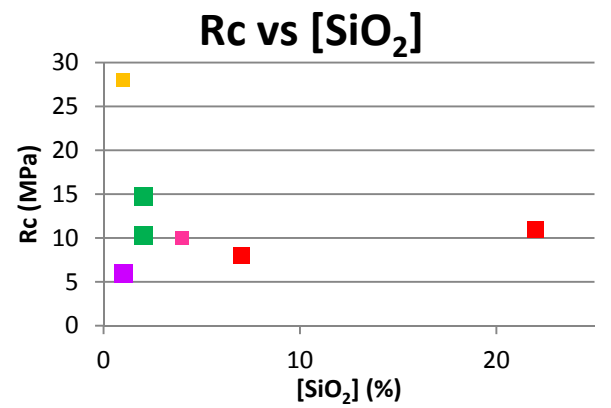
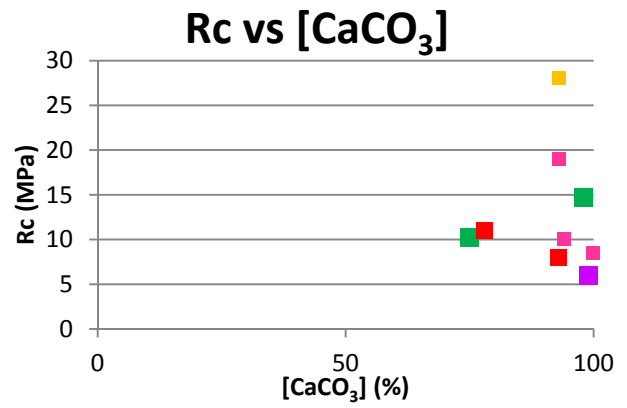
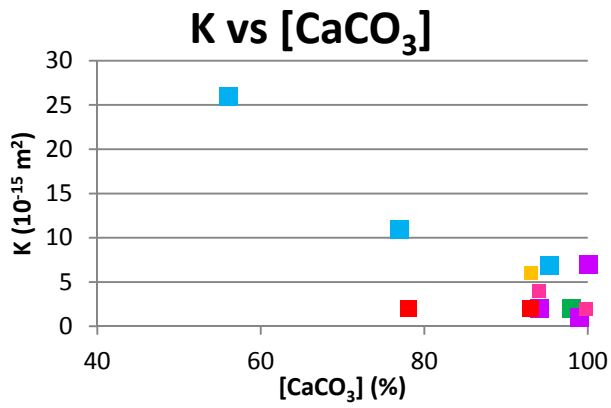
A2. Corrélation entre les propriétés trouvées dans la bibliographie

Les graphes présentés ci-après n'ont pour unique but que de rendre compte d'une possible corrélation (simple) entre les divers paramètres évoqués dans le précédent tableau, tirés de la bibliographie. Ils n'ont pas la prétention d'exprimer l'existence d'une tendance de manière quantitative mais purement qualitative. Certaines corrélations ont volontairement été supprimées par manque de données.









A3. Compléments de l'état de l'art

Extrait de l'échelle des temps géologique

Ere	Système	Série	Etage	Age (Ma)	
CENOZOÏQUE	Quaternaire	Holocène		0,0117	
		Pléistocène	Tarantien	0,126	
			Ionien	0,781	
			Calabrien	1,806	
			Gélasien	2,58	
	Néogène	Pliocène	Plaisancien	3,600	
			Zandéen	5,333	
		Miocène	Messinien	7,246	
			Tortonien	11,62	
			Serravallien	13,82	
			Langhien	15,97	
			Burdigalien	20,44	
			Aquitanien	23,03	
		Paléogène	Oligocène	Chattien	28,1
				Rupélien	33,9
	Éocène		Priabonien	38,0	
			Bartonien	41,3	
			Lutétien	47,8	
			Yprésien	56,0	
	Paléocène		Thanétien	59,2	
Sélandien			61,6		
Danien			66,0		
MESOZOÏQUE	Crétacé	Supérieur	Maastrichtien	72,1 ± 0,2	
			Campanien	83,6 ± 0,2	
			Santonien	86,3 ± 0,5	
			Coniacien	89,8 ± 0,3	
			Turonien	93,9	
			Cénomanién	100,5	
		Inférieur	Albien	≈113,0	
			Aptien	≈125,0	
			Barrémien	≈129,4	
			Hauterivien	≈132,9	
			Valanginien	≈139,8	
Berriasien	≈145,0				

(Source : BRGM)

Gisements, environnement de dépôt et tectonique

La craie est une roche sédimentaire considérée comme rare car elle est faiblement représentée géographiquement à l'échelle du globe (voir Figure A.1). Présente presque exclusivement dans l'hémisphère Nord, ces dépôts caractéristiques se sont formés sous une tranche d'eau inférieure à 250 m et sur une courte période – du Cénomanién, Crétacé Supérieur, Mésozoïque au Danien, Paléogène, Cénozoïque. La très grande épaisseur des dépôts de craie atteignant parfois le kilomètre et la courte période de sédimentation (environ 35 Ma) témoignent de l'activité biologique très importante de la flore marine (Schroeder 2002 estime une vitesse de sédimentation de l'ordre de 15 cm/1000ans).

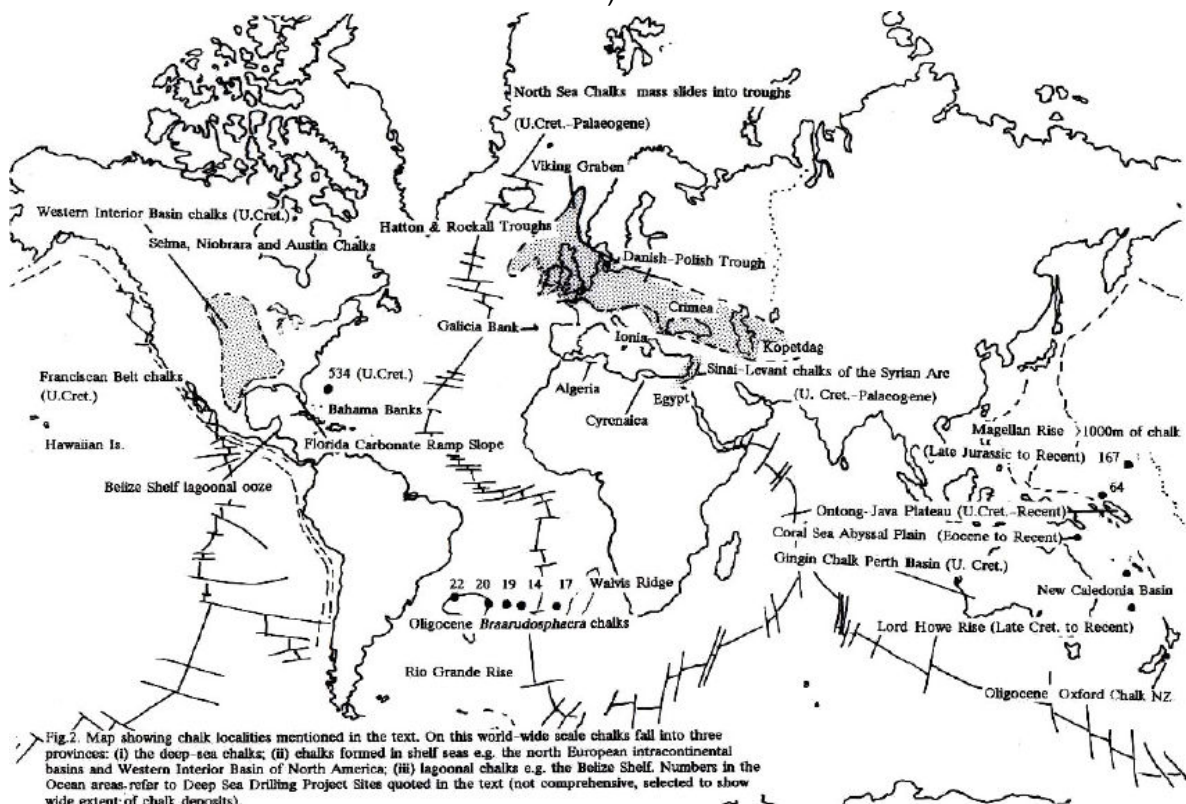


Figure A.1: Situation géographique des deux bassins crayeux principaux (aux Etats Unis et en Europe) et des divers gisements de craie (d'après Mortimore 1989)

Le Mésozoïque correspond dans son ensemble à des cycles de transgressions-régressions de premier ordre et est caractérisé par des événements tectoniques majeurs, tels la dislocation de la Pangée et l'ouverture de l'océan Atlantique, la formation/fermeture de la mer Thétys et l'amorce des orogénèses alpine et pyrénéenne. Le Crétacé Supérieur est la période la plus chaude et correspond au plus haut niveau marin des temps phanérozoïques (Haq et al. 1987). Il est subdivisé en 6 étages.

La plus grande transgression a lieu du Cénomanién au Turonien avec une phase d'extension rapide des plaques et une avancée spectaculaire de la mer sur les plateformes continentales (Figure A.2). Celle-ci, déjà initiée au début du Trias, amène à une interconnexion des océans et un recouvrement du socle cratonique

(par exemple, en Amérique du Nord, un bras de mer continentale reliait l'actuelle mer des Caraïbes à l'Océan Arctique). L'activité au niveau des dorsales océaniques enrichit les océans en calcium.

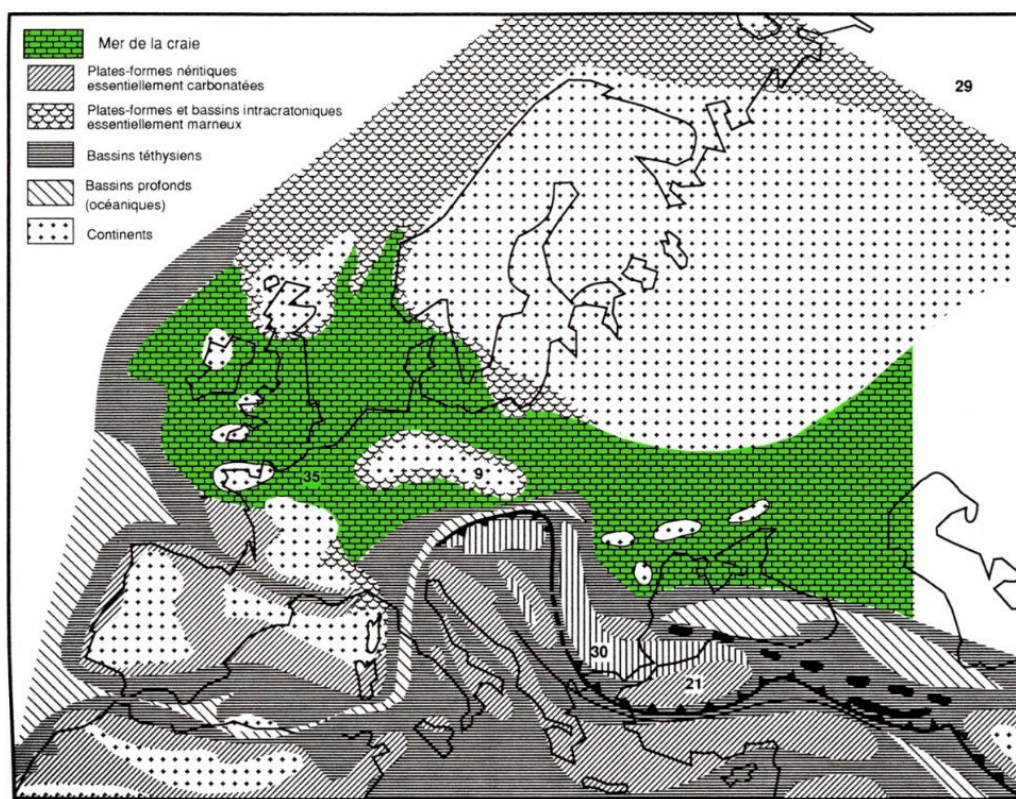


Figure A.2 : Etat des dépôts géologiques en Europe au Crétacé Supérieur (d'après Elmi et Babin 2006)

La transgression dans les bassins intracratoniques de faible profondeur, la production massive de CO_2 et un rapport Mg/Ca faible causés par l'extension rapide des océans favorisent la production et la sédimentation des tests de nannoplancton caractéristiques des craies.

La formation des dépôts, synchrone avec les différentes phases de l'orogénèse alpine et de l'extension océanique présente pourtant peu de déformations marquées. Certaines ondulations ne sont que le vestige de la géométrie des terrains sous-jacents hérités de l'époque hercynienne (Schroeder 2002). La plupart des déformations rencontrées se présentent sous forme de plis de grande amplitude principalement orientés NW-SE (compression dans la direction NE-SW et N-S). Elles résultent de deux grandes phases de plissement d'orientations différentes ayant eu lieu sous la lointaine influence de l'orogénèse alpine (par exemple, l'anticlinal de Meudon situé dans le Bassin Parisien présente une forme arrondie) et d'accidents le plus souvent partiellement synsédimentaires (Vandycke 1992, période d'extension de la fin du Crétacé). Mais en raison de certaines périodes d'inversion (phases de compression) divers accidents témoins d'une extension cohabitent avec des accidents de compression (Figure A.3) (Gennaro et al. 2013). Du fait de ces accidents, certaines craies se retrouvent enfouies à plus ou moins grande profondeur

(par exemple les craies de Mer du Nord, Figure A.4). Suite à leur diagenèse plus ou moins marquée, ces craies répondent, physiquement et mécaniquement, d'une manière différente de celles qui affleurent ou situées à faible profondeur. Ce type de craie est d'ailleurs souvent source d'hydrocarbures (exemple du gisement d'Ekofisk).

Il est donc nécessaire de prendre en compte la profondeur des gisements – donc leur histoire diagénétique – dans l'analyse des mécanismes et des phénomènes prenant place dans la craie.

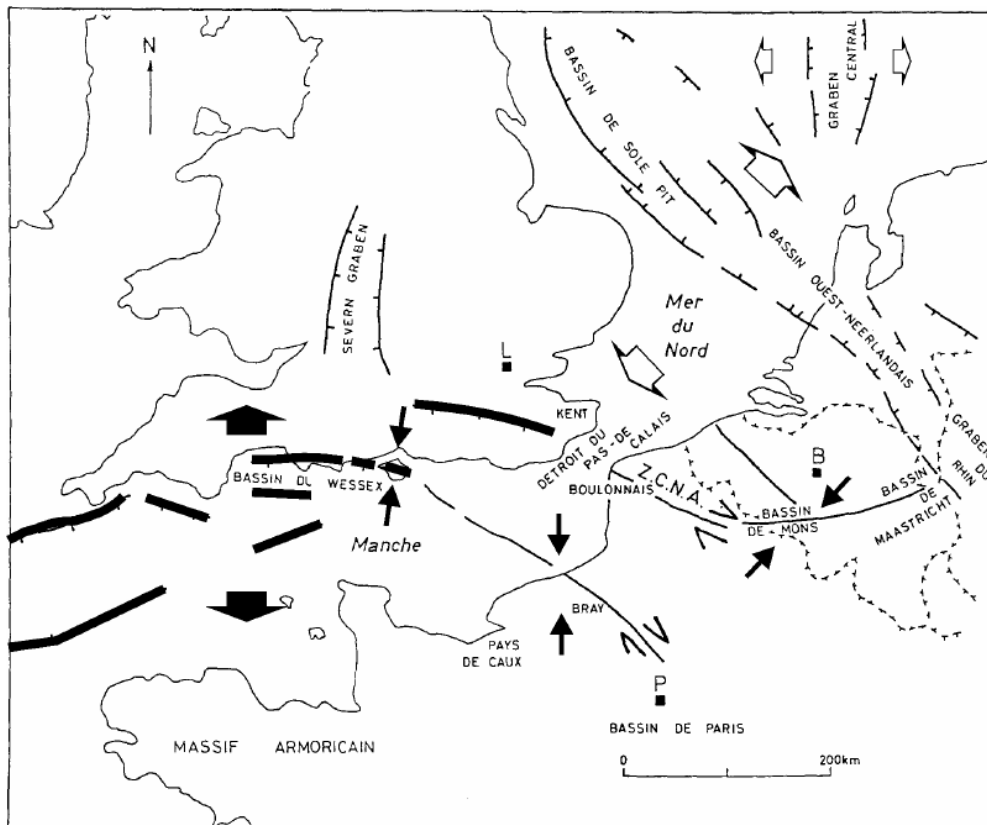


Figure A.3 : Carte schématique des grands ensembles structuraux méso-cénozoïque du Nord- Ouest Européen. L : Londres, P : Paris, B : Bruxelles, Z.N.C.A : Zone de Cisaillement Nord-Artois. Les flèches indiquent les orientations de contraintes majeures (Schroeder 2002, d'après Vanduycke 1992)

La diagenèse est l'ensemble des processus physique, biochimique et physico-chimique qui interviennent dans la transformation des sédiments en roches sédimentaires. La diagenèse est dite précoce s'ils prennent place dès dépôt au fond des eaux ou tardive lorsqu'ils prennent place une fois les sédiments enfouis sous d'autres couches. Pendant l'enfouissement, du fait d'une augmentation de pression et de température, la roche se compacte, les fluides sont expulsés, les cristaux changent de forme et de structure (l'aragonite, thermodynamiquement instable, se transforme en calcite). La silice sous forme de calcédoine remplace les éléments squelettiques et se concentre en nodules, les fameux silex. Lord et al. 2002 a répertorié les divers mécanismes et l'étendue des phénomènes diagénétiques dans les craies anglaises.

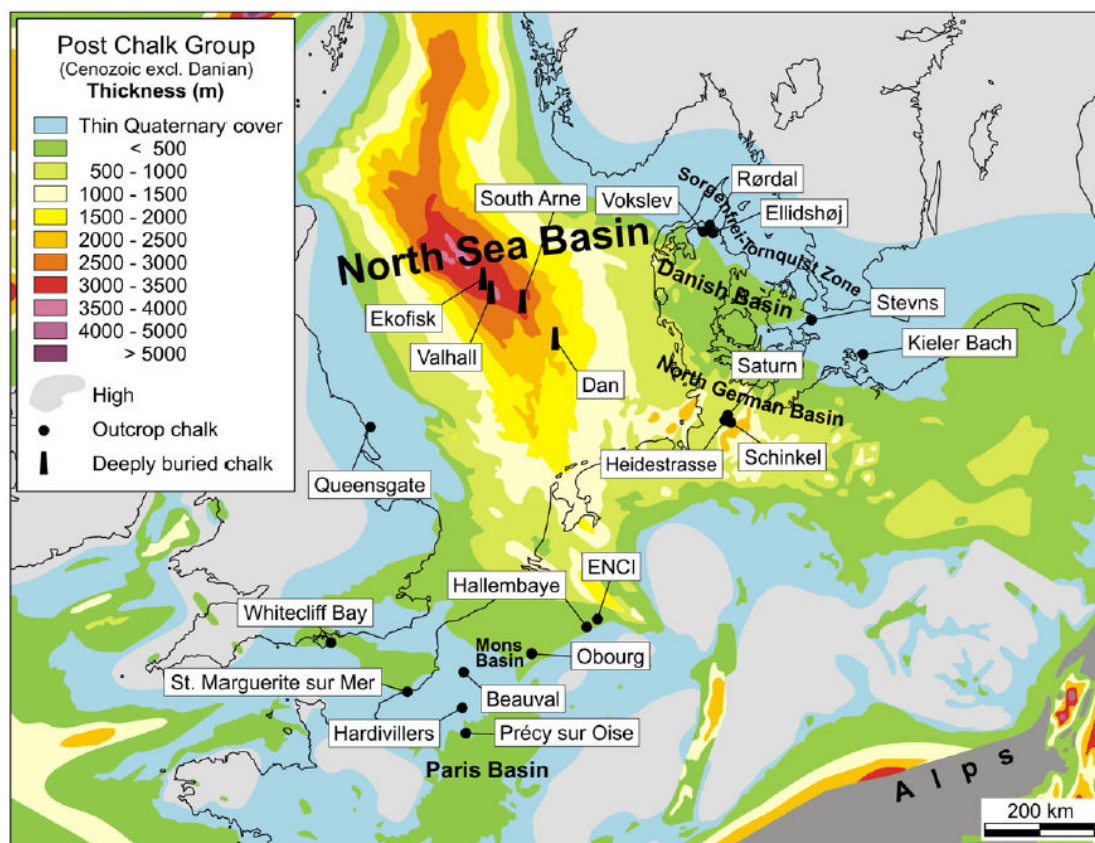


Figure A.4 : Carte de la Mer du Nord localisant quelques craies du Crétacé Supérieur et leur profondeur (Hjuler et Fabricius 2009, d'après Ziegler 1990)

Pour la craie, la diagenèse est assez limitée puisque les deux principaux aspects de diagenèse dans les roches carbonatées, à savoir la cimentation et la transformation iso-chimique, ne sont pas beaucoup représentés dans les craies et ce même pour les craies de Mer du Nord enfouies à plus de 3 km de profondeur. Pour les craies affleurantes, cela s'explique en partie par la faible profondeur des couches et la présence inhibitrice de magnésium dans la composition de la calcite (Scholle 1977). Pour les craies de Mer du Nord, les sédiments fins argileux qui les recouvrent tendent à empêcher l'expulsion du fluide lors de l'enfouissement, bloquant ainsi les phénomènes de compaction (diminution de la contrainte effective). On retrouve néanmoins selon les endroits des stilolythes, témoins du phénomène de dissolution sous contrainte.

Viscosité de la craie

En terme de viscosité, Nguyen 2009 montre que la viscosité de la craie d'Estreux (Turonien, Crétacé Supérieur) est bien représentée par une viscosité Isotach. Selon Tatsuoka 2006, il s'agit de la viscosité la plus rencontrée dans les roches (roches tendres sédimentaires, argiles plastiques, matériaux granulaires à granulométrie uniforme...) et correspond à un comportement pré-pic lorsque la vitesse de déformation est constante. Les contraintes de viscosité ne dépendent que des déformations plastiques et de la vitesse de chargement. Cette relation est unique et ne dépend pas de l'histoire ni du chemin de chargement, mais dépend cependant des paramètres instantanés. Tatsuoka 2006 propose deux autres types de viscosité en réponse au cisaillement (Figure A.5): la viscosité TESRA (la relation énoncée précédemment dépend cette fois du chemin de chargement et n'est donc plus unique – en comportement post-pic) et la viscosité P&N (mélange des deux autres types de viscosité, une composante positive correspondant à l'augmentation de la vitesse de chargement et une composante négative de la viscosité Isotach), mais elles ne seront pas abordées ici.

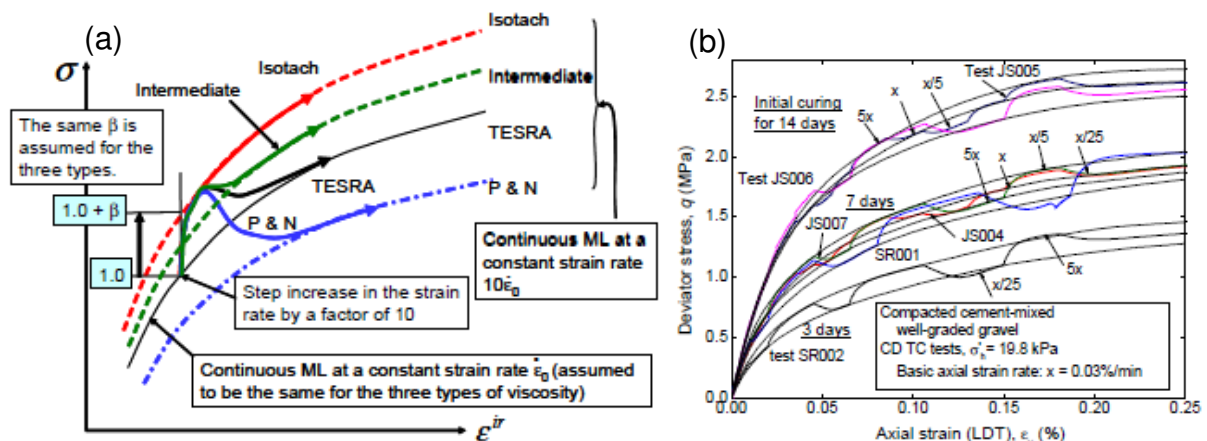


Figure A.5: (a) Différents types de viscosité et (b) cas particulier de la viscosité Isotach en régime pré-pic. Cas d'un matériau granulaire plus ou moins consolidé (Tatsuoka 2006). Les courbes noires correspondent aux courbes limites.

Néanmoins, notons que selon lui, le type de viscosité dépend de la forme des particules (grain anguleux ou rond), de leur taille, de la cimentation (contact inter-particulaire de fort à nul) et du type de chargement. Une courbe d'essai montrant la viscosité Isotach est donnée en Figure A.5b. Dans le cas des craies à très forte porosité – comme la craie de Mer du Nord (47.3%) ou celle de Lixhe (Priol et al. 2007) pour des vitesses de chargements lent et rapide, l'évolution entre la contrainte effective axiale et la déformation axiale peut être assimilée à un comportement de type Isotach. L'augmentation de la vitesse de chargement écroute la craie et accroît sa limite d'élasticité sans modifier sa compressibilité (Dahou et al. 1995, Schroeder 2002, De Gennaro et al. 2004). Le fluage d'après Nguyen 2009 ne semble donc pas dépendre de la contrainte appliquée mais du rapport de celle-ci à la limite d'élasticité.

Selon Hickman et Gutierrez 2007, il existe une relation entre fluage et vitesse de déformation qui définit le concept d'âge équivalent reliant la vitesse de déformation et la ligne de temps (De Gennaro et Pereira 2008). Elle est présentée dans un diagramme indice des vides - contrainte verticale sur la Figure A.6.

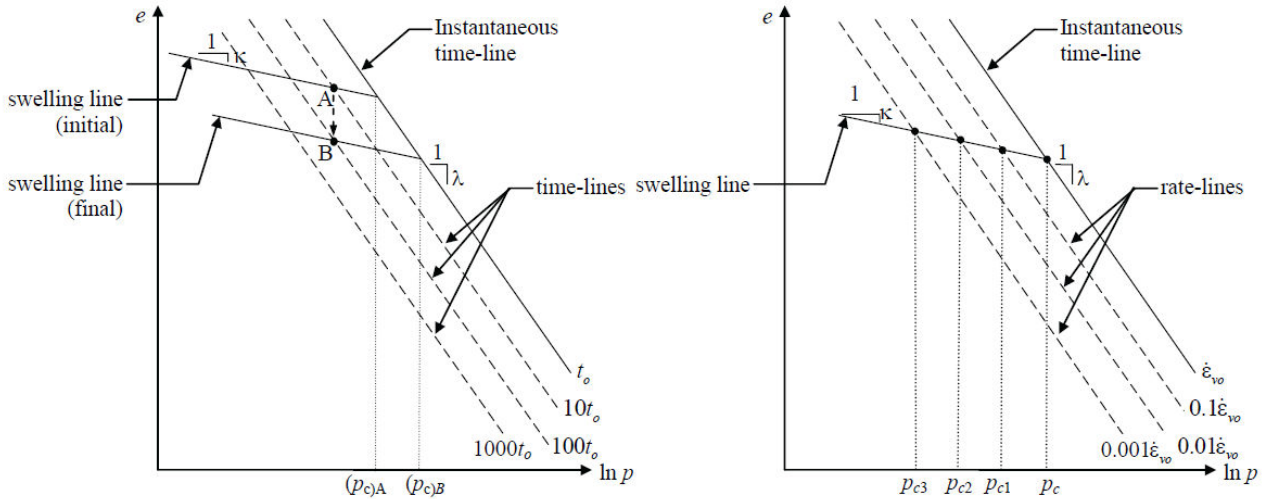


Figure A.6 : Relation entre fluage (time-line) et comportement Isotach (rate-line)
(Hickman et Gutierrez 2007)

Annexe B :
Courbes d'essais et résultats
Propriétés physiques et mécaniques
CT

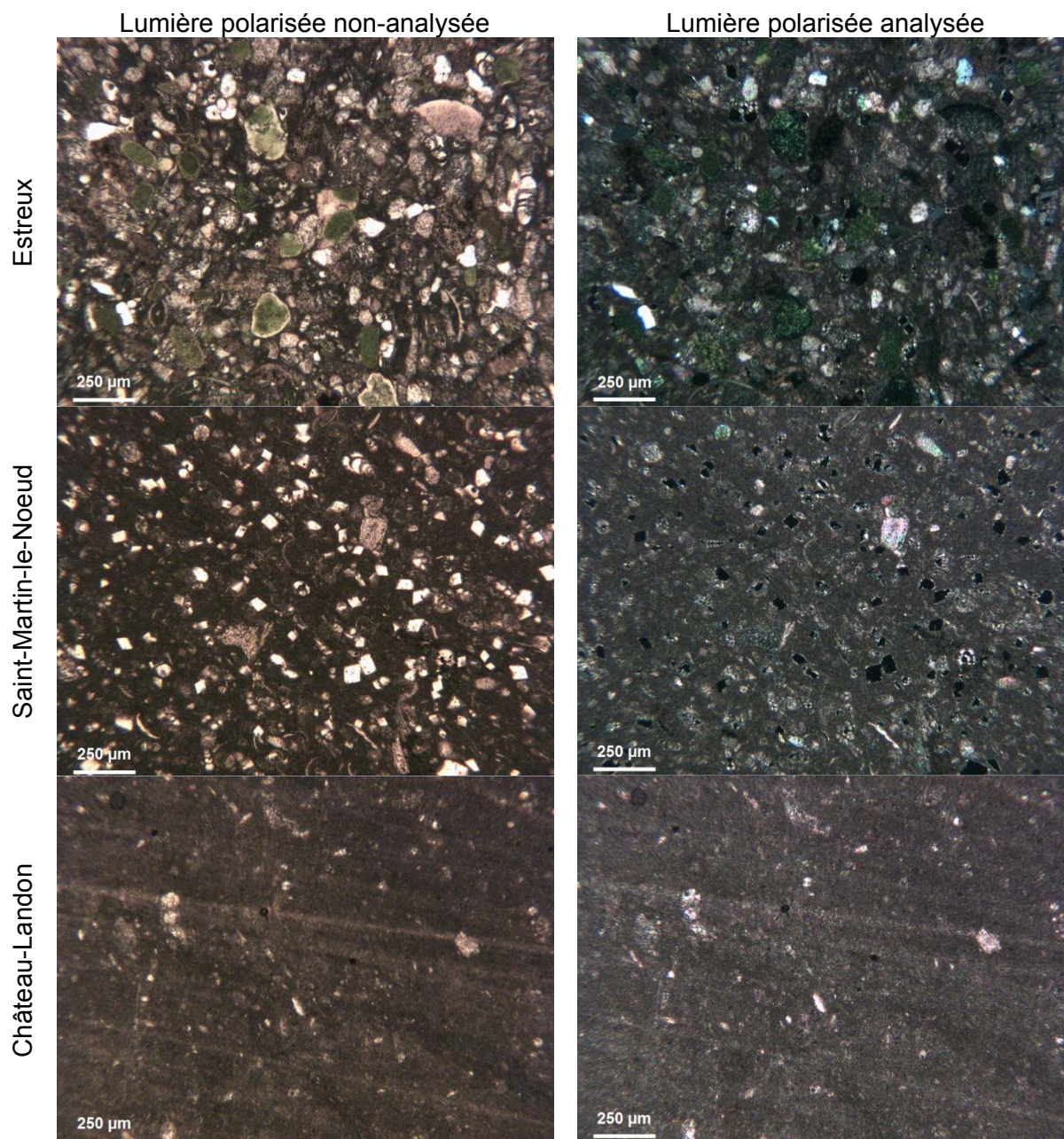
B1. Pétrographie et microstructure.....	3
B2. Perméabilités et porosités.....	4
B3. Propriétés mécaniques	11

B1. Pétrographie et microstructure

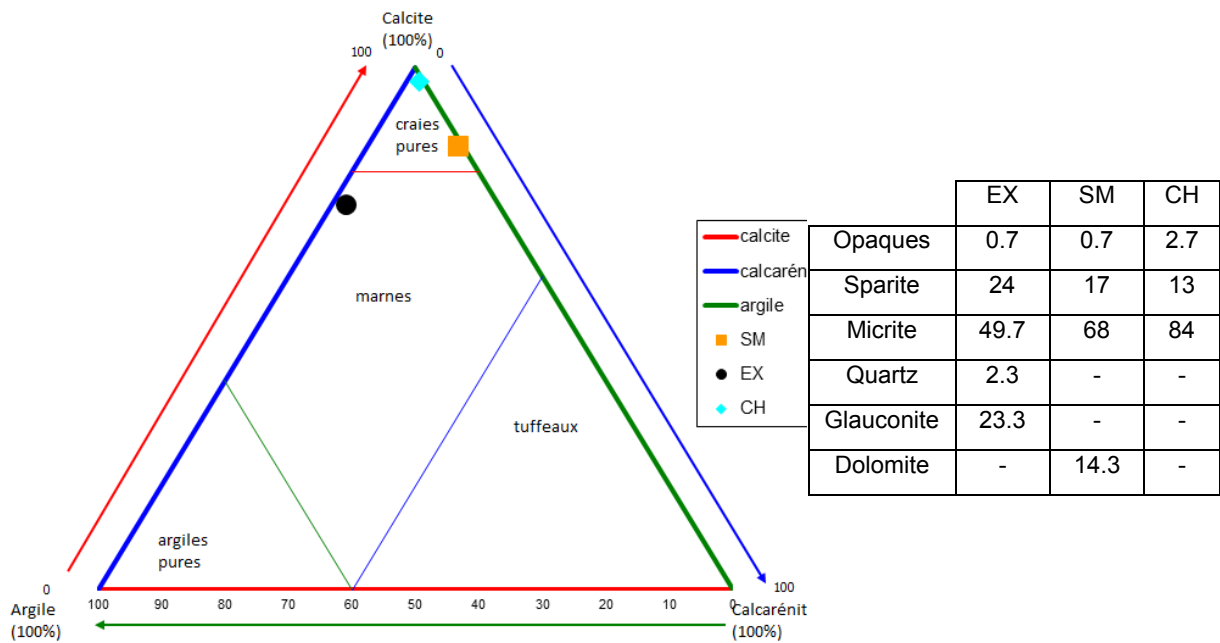
Données physiques des craies

	Saint-Martin, Fr	Estreux, Fr	Château-Landon, Fr
n(%)	42	35	44
w(%)	27	19	30
ρ_s (g.cm-3)	2.78	2.75	2.76
ρ_h (g.cm-3)	2.04±0.07	2.13±0.02	2.02±0.02
ρ_d (g.cm-3)	1.61±0.07	1.79±0.03	1.56±0.01
[CO ₃ ²⁻]	85	75	97

Lames minces des trois craies



Place des trois craies dans le diagramme ternaire



B2. Perméabilités et porosités

Perméabilité

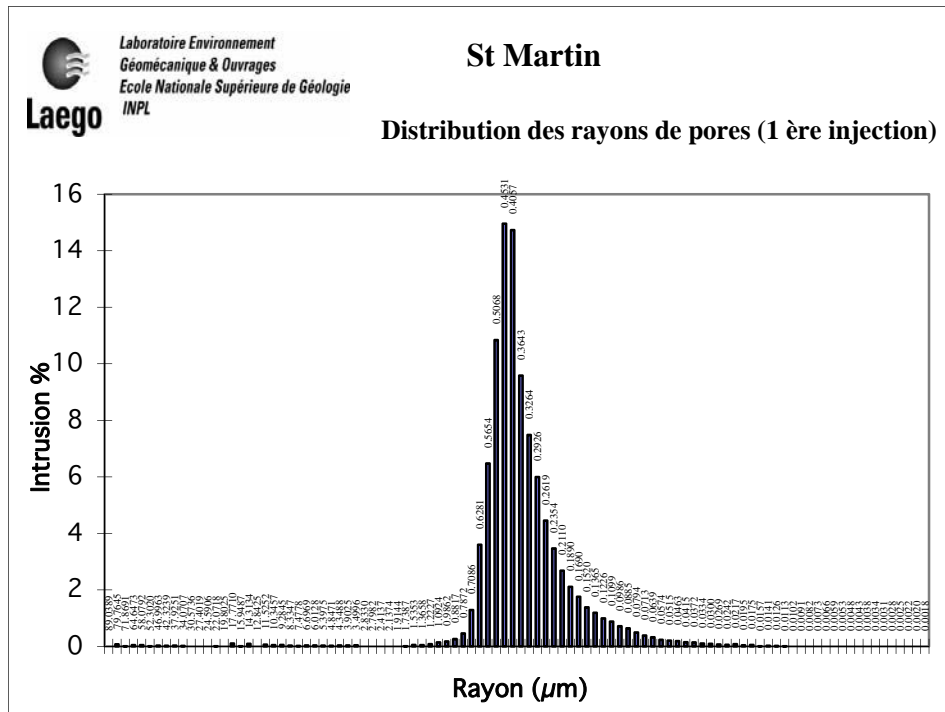


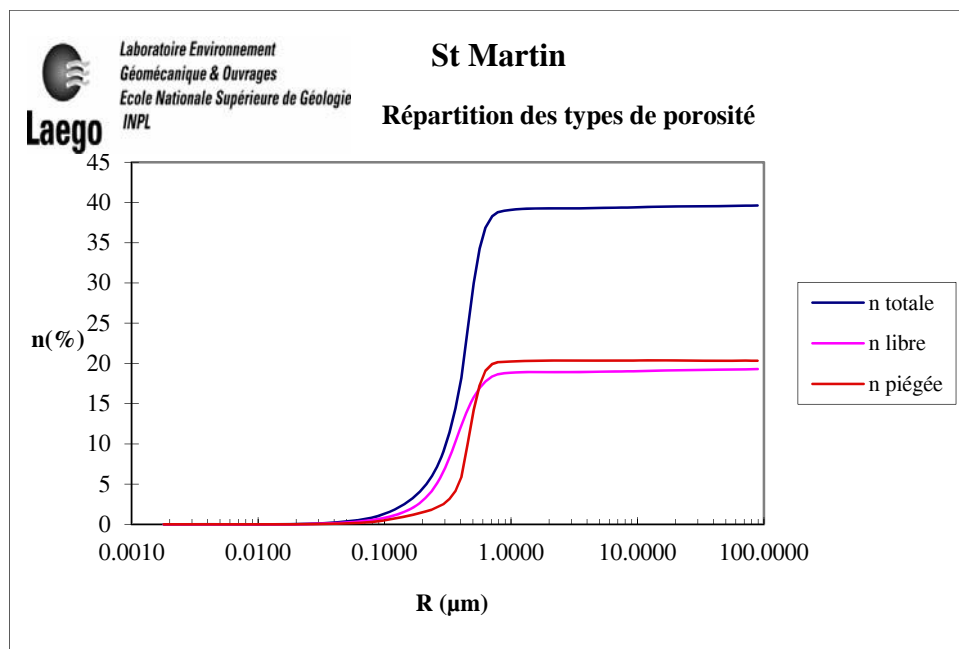
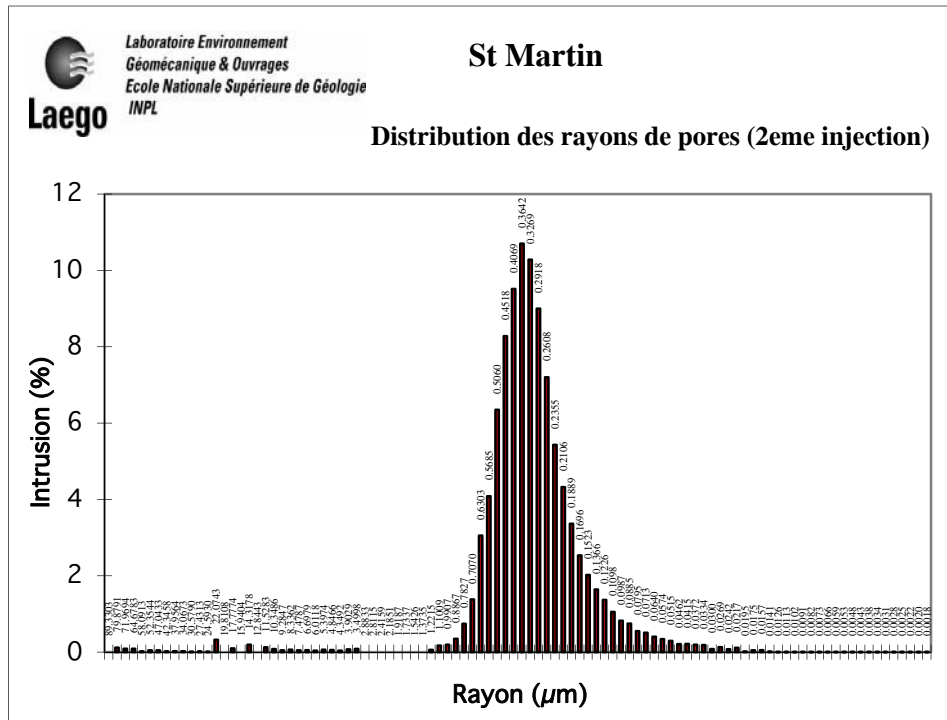
Ech.	ø(mm) L(mm)	Les nombres dans les différentes cases ont les correspondances suivantes:																		k (m ²) Ordre de grandeur		
		P _i (MPa)		P _f (MPa)		Q _m (L/h)		k (m ²)		P _i (MPa)		P _f (MPa)		Q _m (L/h)		k (m ²)						
SM31	49.26	0.1	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8	0	0.9	0	1.0	0	10 ⁻¹⁵
	99.66	2.7	1.10E-14	5.6	7.64E-15	10.1	5.83E-15	15.4	5.05E-15	21.2	4.46E-15	27.9	4.05E-15	35.3	3.81E-15	43.5	3.59E-15	54.1	3.48E-15	64.2	3.39E-15	
EX29	49.23	0.1	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8	0	0.9	0	1.0	0	10 ⁻¹⁵
	99.73	-	-	5.2	7.82E-15	10.3	5.96E-15	15.7	5.20E-15	21.7	4.60E-15	28.9	4.23E-15	36.8	3.96E-15	45.5	3.79E-15	57.3	3.68E-15	68.3	3.59E-15	
CH12	48.89	0.1	0	0.2	0	0.3	0	0.4	0	0.5	0	0.6	0	0.7	0	0.8	0	0.9	0	1.0	0	10 ⁻¹⁴
	87.49	13.0	6.36E-14	32.2	3.72E-14	55.7	3.08E-14	changement de débitmètre				200	2.53E-14	230	1.96E-14	260	1.91E-14	320	1.87E-14	380	1.77E-14	

Ech.	Les nombres dans les cases ont les correspondances suivantes:		P_i (MPa) P_f (MPa)		Q_c (m^3/s)	k (m^2)	k (m^2)				
	ϕ (mm)	L (mm)									
CH34	37.54	0.249	0.245	2.33E-15	0.109	0.0926	1.32E-15	0.204	0.202	5.56E-15	10^{-15}
	23.35	1.97E-09			4.10E-09			2.04E-09			
CH35	37.61	0.12	0.112	2.43E-15	0.319	0.319	1.56E-14	0.42	0.411	2.36E-15	10^{-15}
	22.23	4.12E-09			2.30E-09			4.17E-09			
CH36	37.6	0.28	0.176	7.37E-17	0.144	0.0616	1.27E-16	0.218	0.182	5.42E-16	10^{-16}
	21.21	1.39E-09			1.90E-09			3.57E-09			
EX23	37.52	0.151	0.101	2.77E-16	0.345	0.308	1.63E-16	0.446	0.401	3.05E-16	10^{-16}
	24.44	2.50E-09			1.10E-09			2.50E-09			
EX24	37.52	0.228	0.202	2.85E-16	0.327	0.302	3.26E-16	0.414	0.379	3.51E-16	10^{-16}
	25.24	1.30E-09			1.40E-09			2.20E-09			
EX25	37.4	0.334	0.322	3.91E-16	0.375	0.278	9.39E-17	0.452	0.175	3.66E-19	10^{-16}
	22.2	9.14E-10			1.80E-09			2.00E-11			
SM19	37.53	0.373	0.35	8.49E-16	0.701	0.631	8.33E-16	0.742	0.619	3.89E-16	10^{-15}
	32.33	2.65E-09			7.97E-09			6.53E-09			
SM24	37.52	0.33	0.237	3.46E-16	-						10^{-15}
	24.44	5.80E-09									
SM29	37.53	0.284	0.223	1.40E-16	0.362	0.338	6.75E-16	0.797	0.791	5.68E-15	10^{-15}
	19.87	1.90E-09			3.60E-09			6.89E-09			

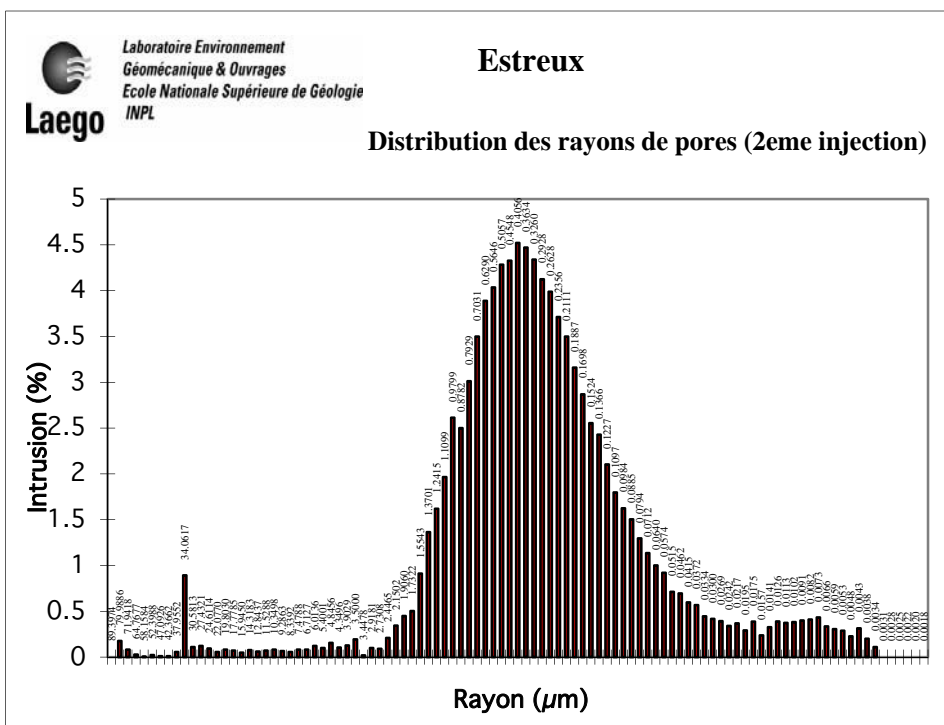
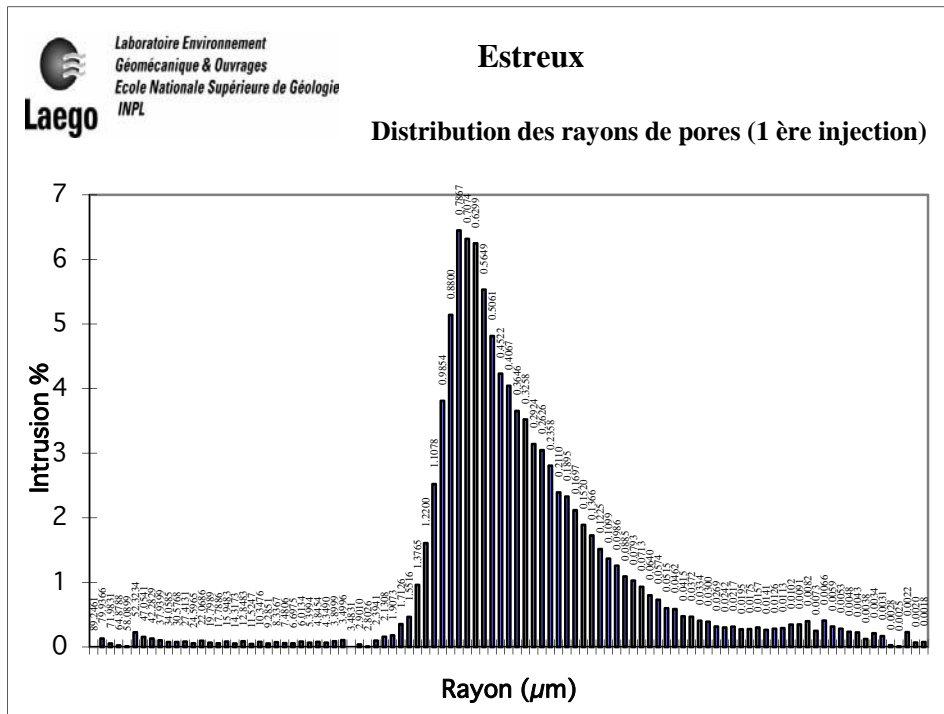
Mesures porosimétriques

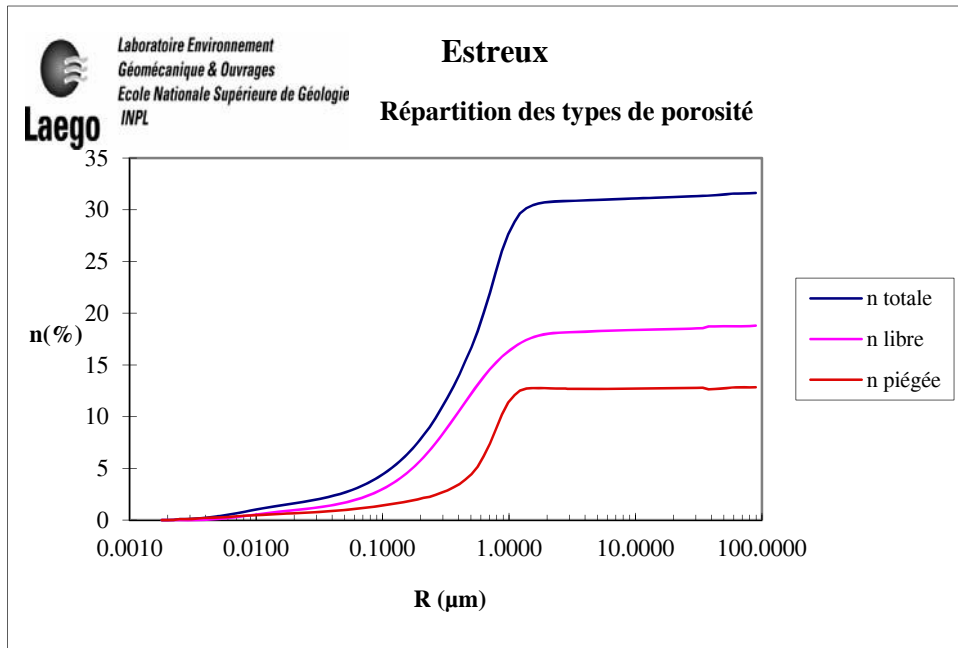
Craie de Saint-Martin-le-Noëud



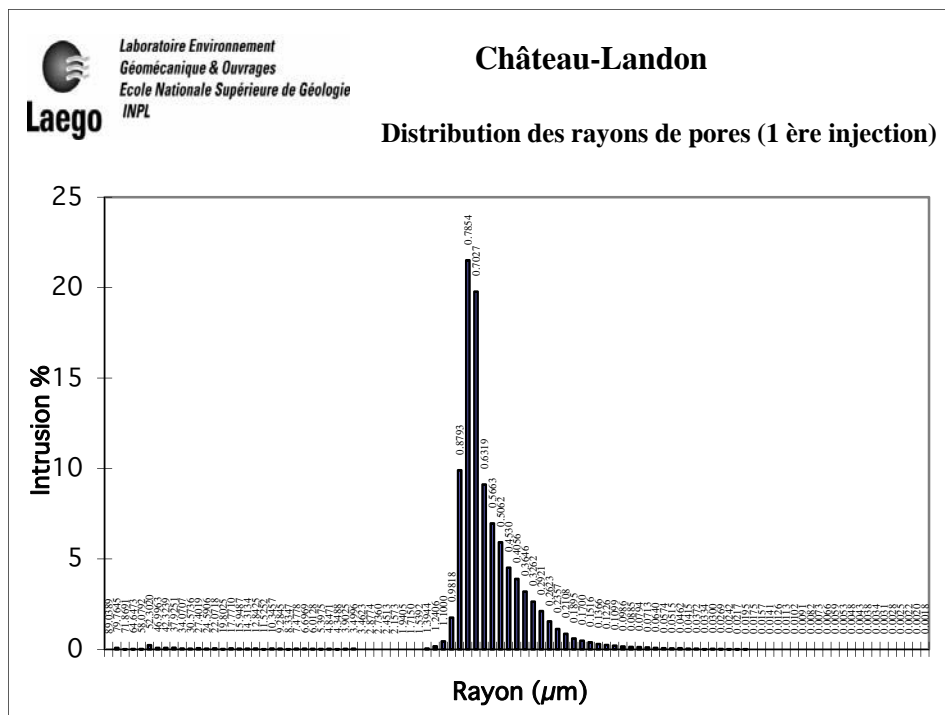


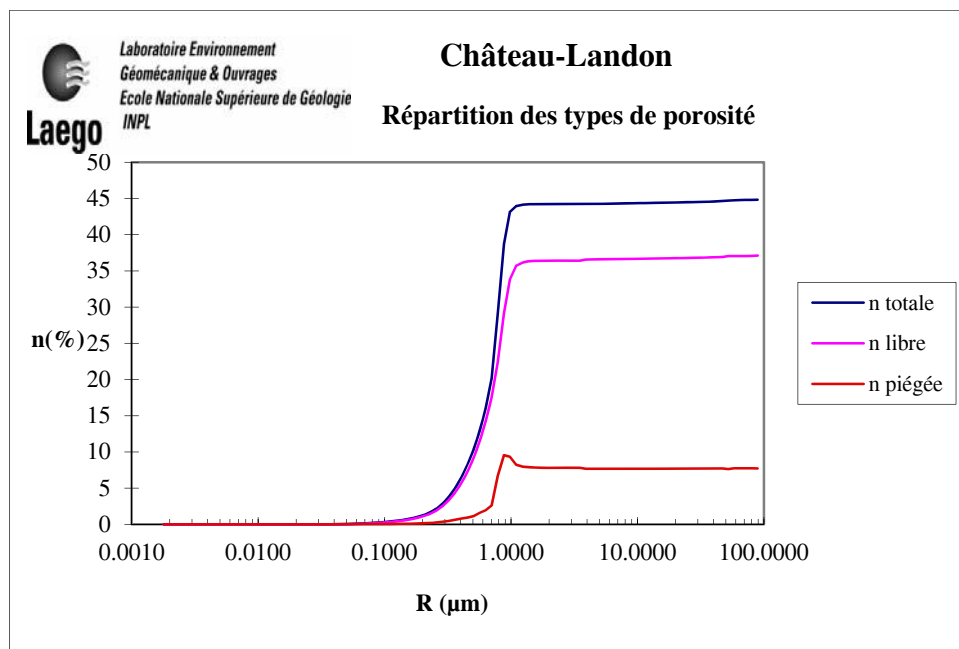
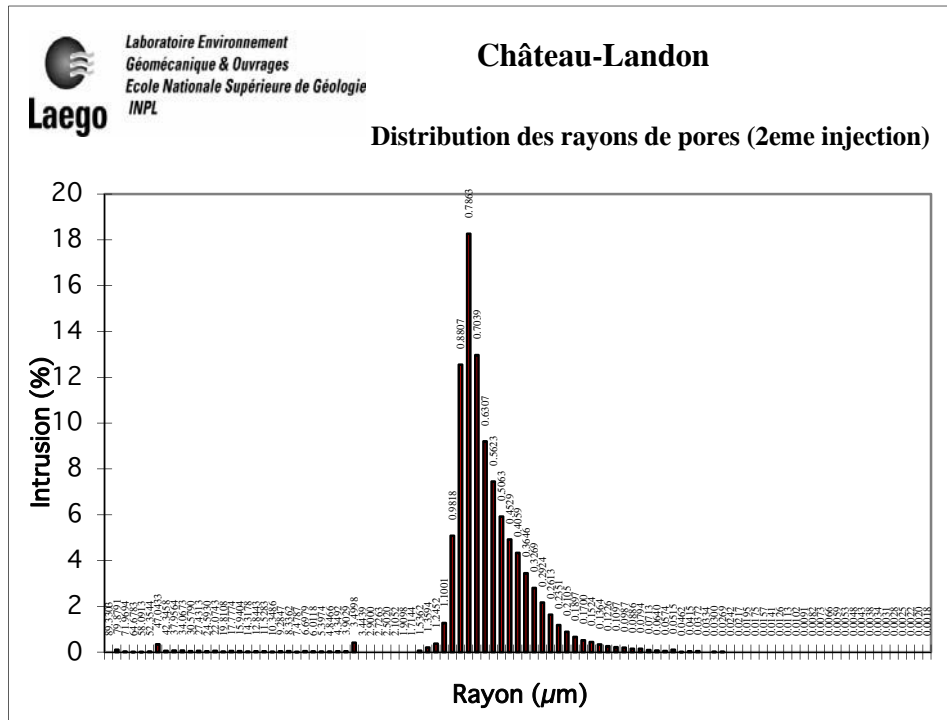
Craie d'Estreux





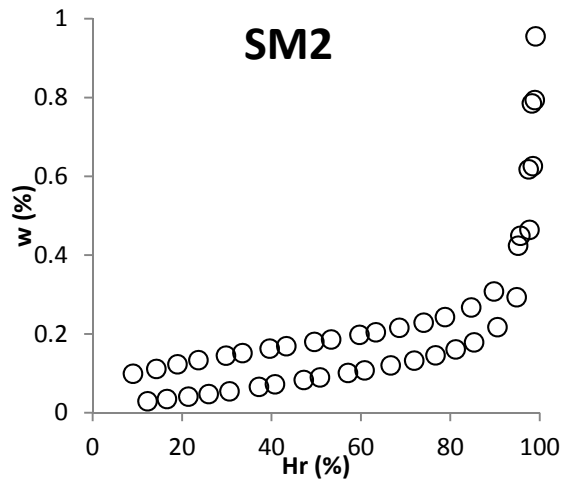
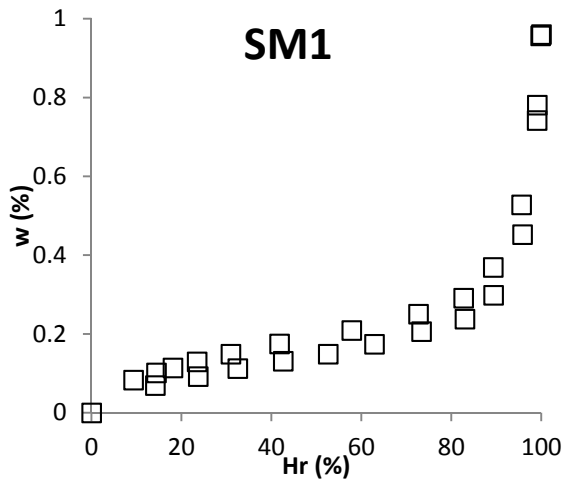
Craie de Château-Landon



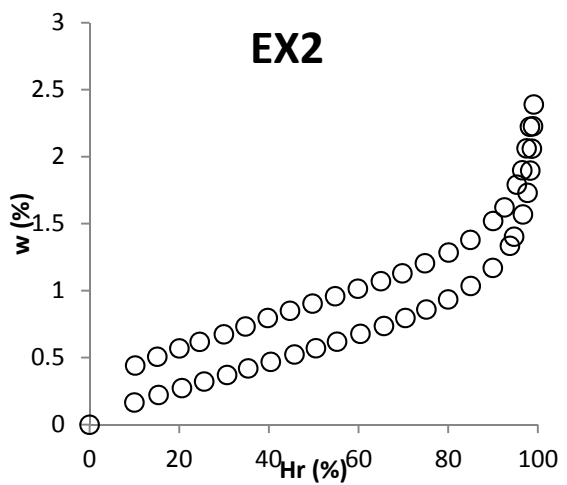
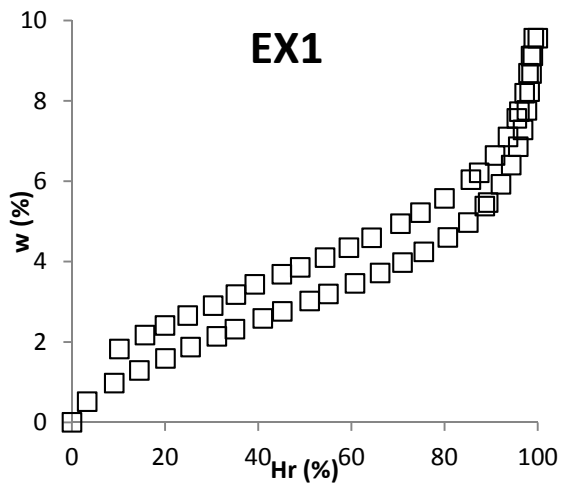


Isothermes de sorption

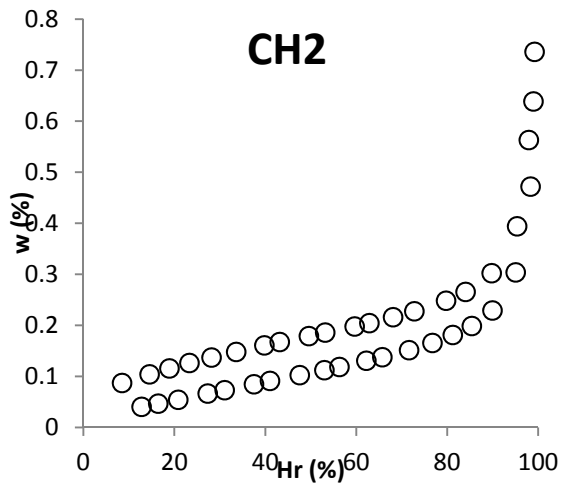
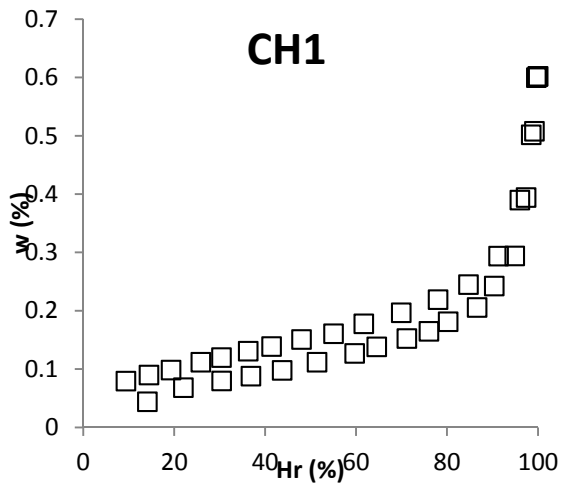
Craie de Saint-Martin-le-Nœud



Craie d'Estreux



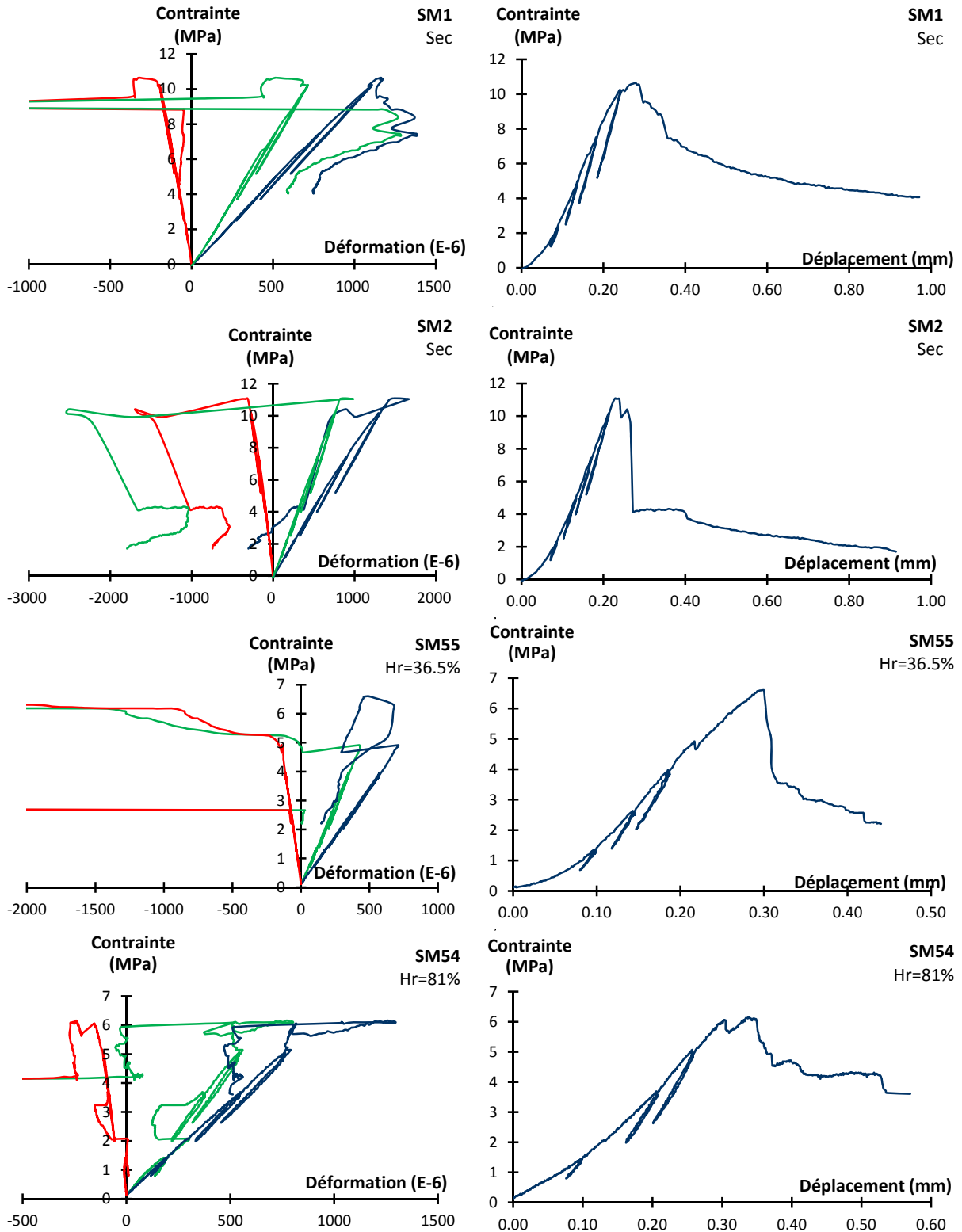
Craie de Château-Landon

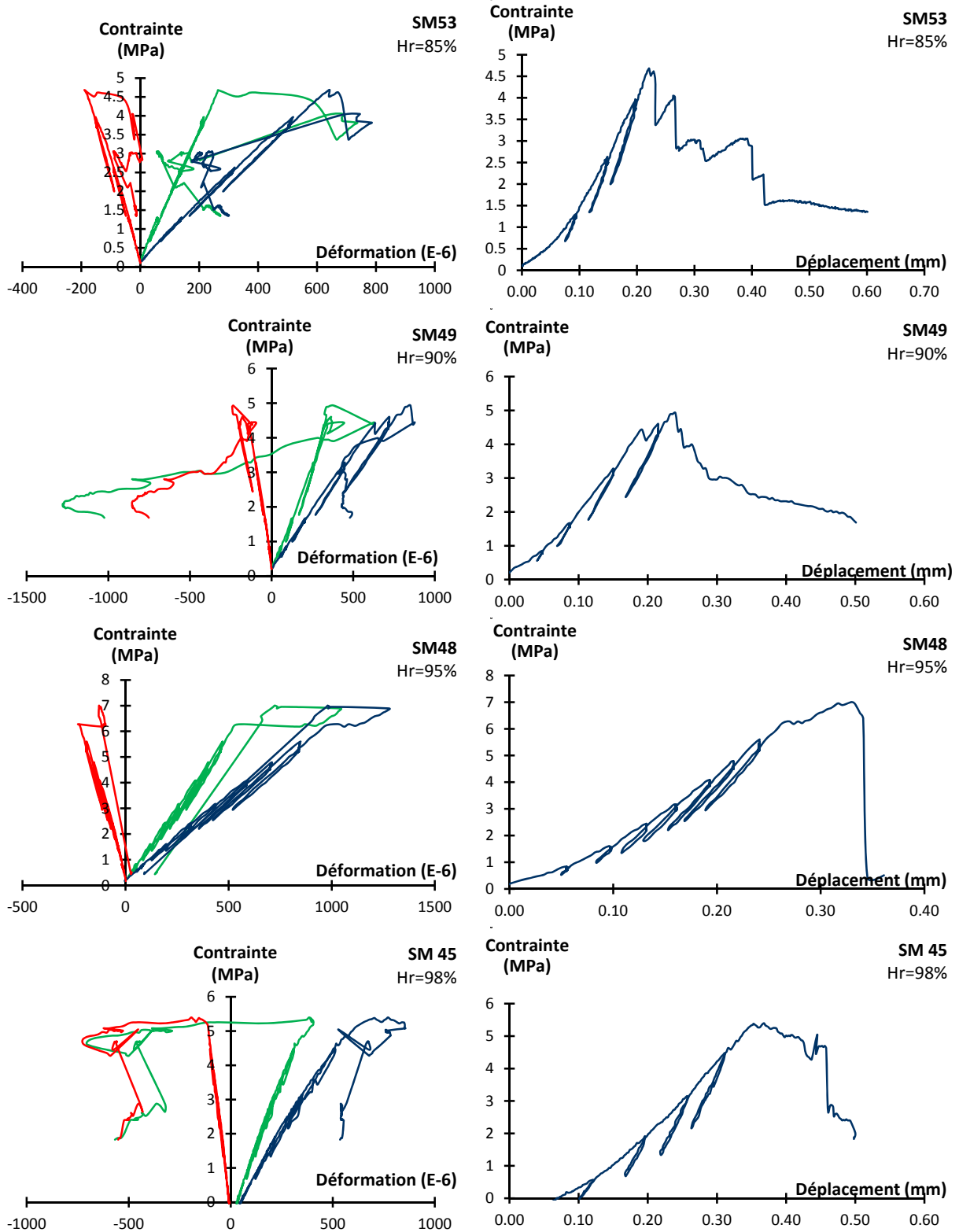


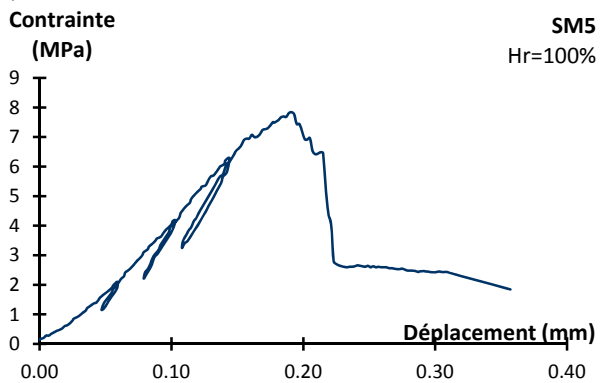
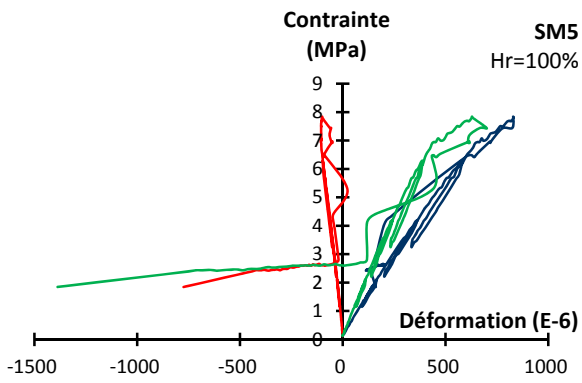
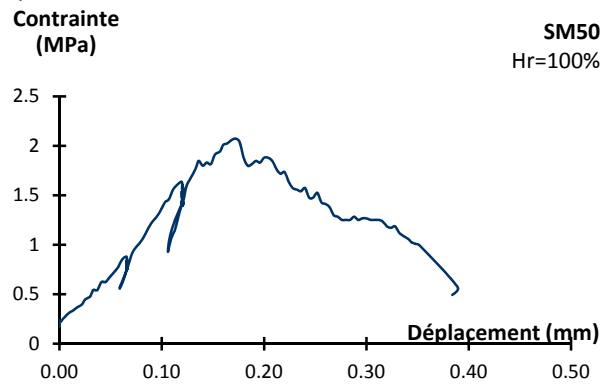
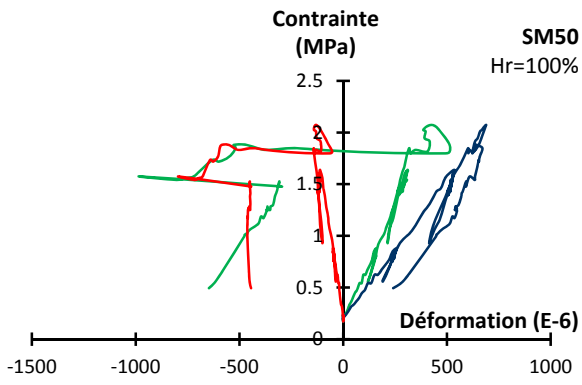
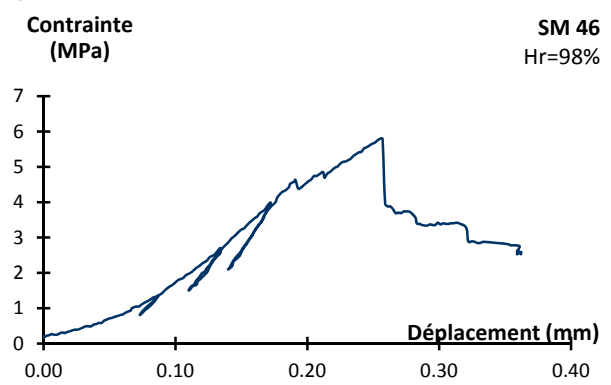
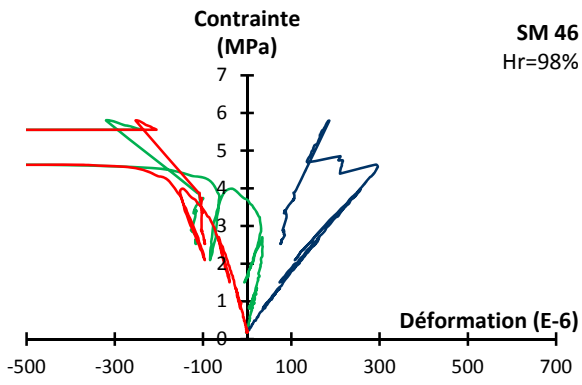
B3. Propriétés mécaniques

Courbes contrainte-déformation et contrainte-déplacement des essais de compression uniaxiale à hygrométrie contrôlée

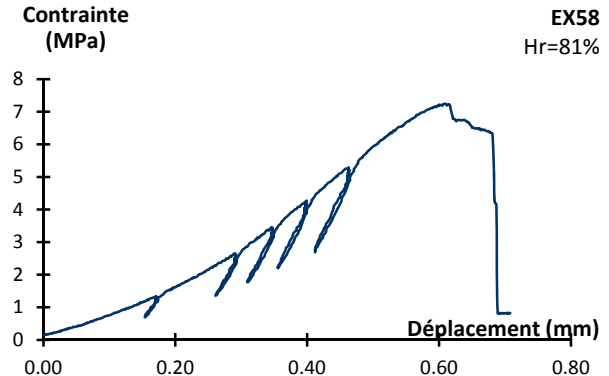
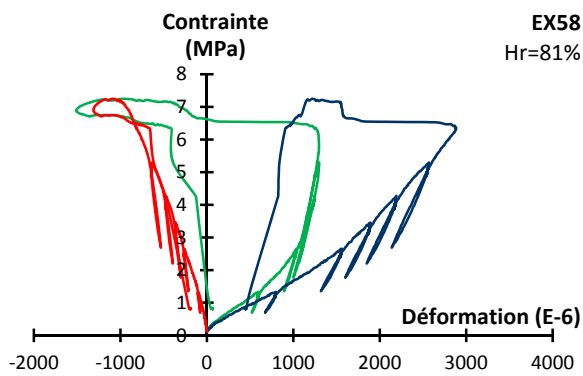
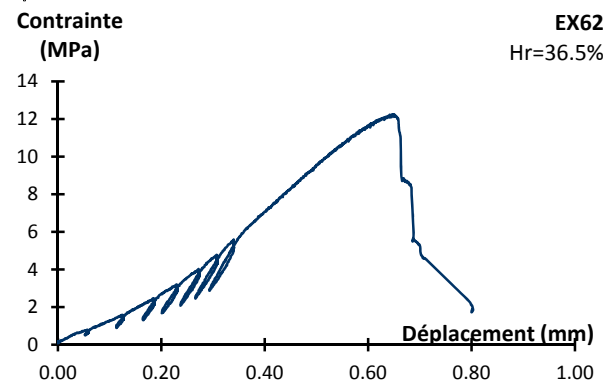
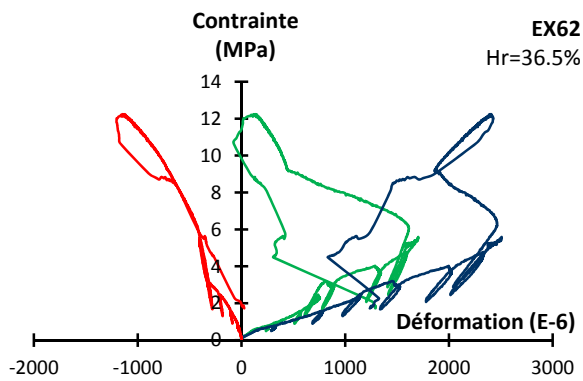
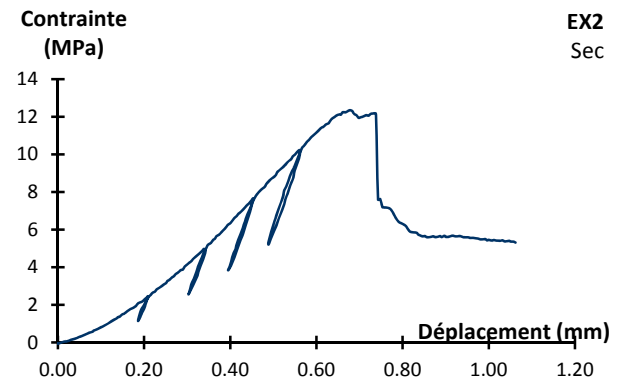
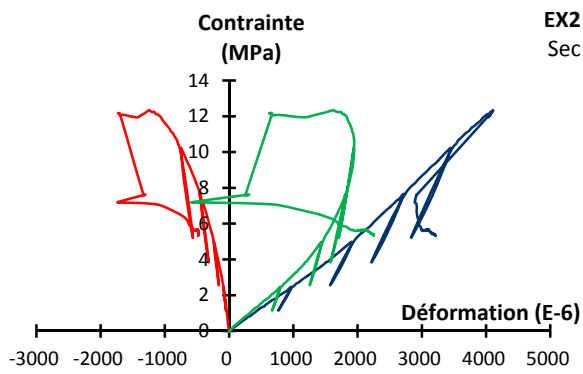
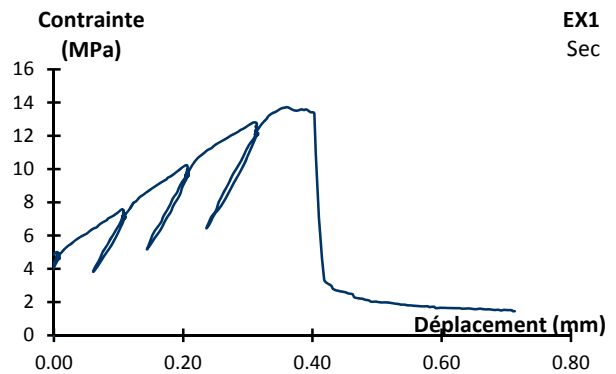
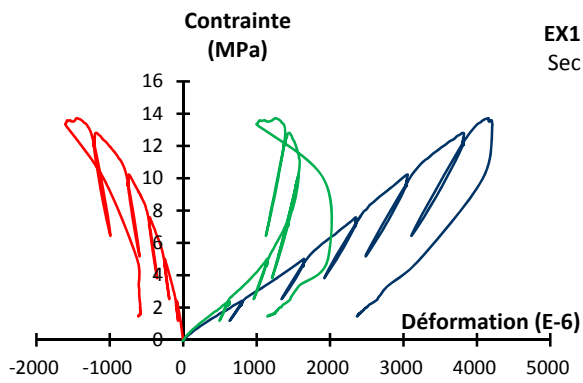
Craie de Saint-Martin-le-Noeud

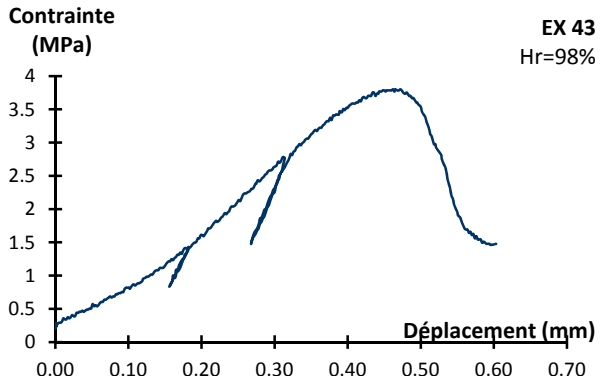
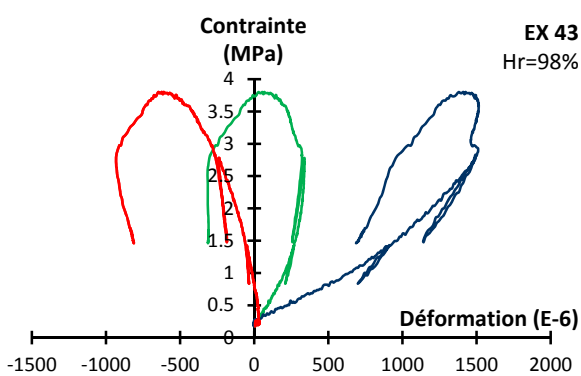
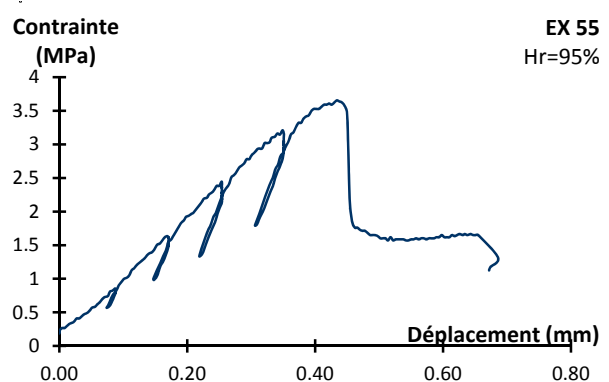
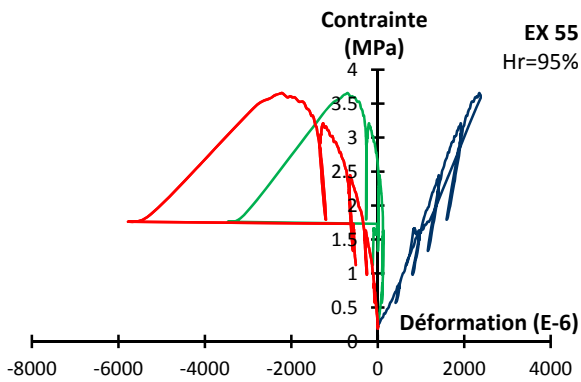
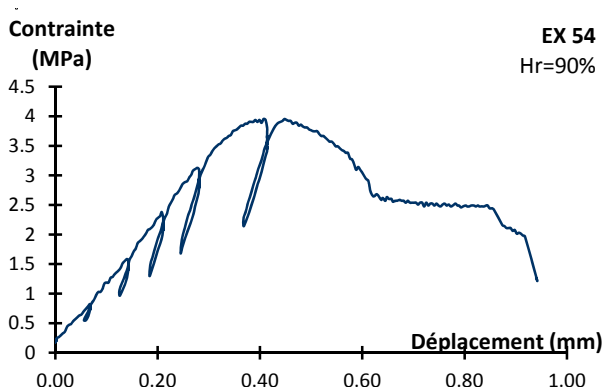
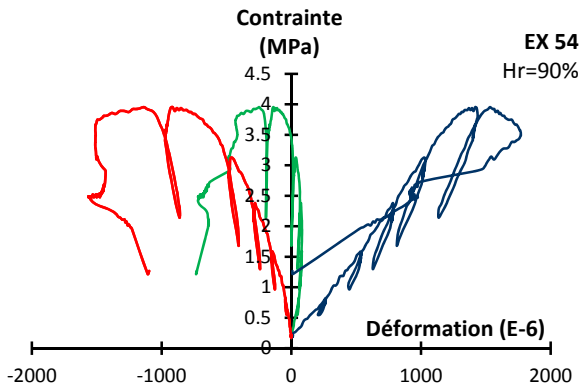
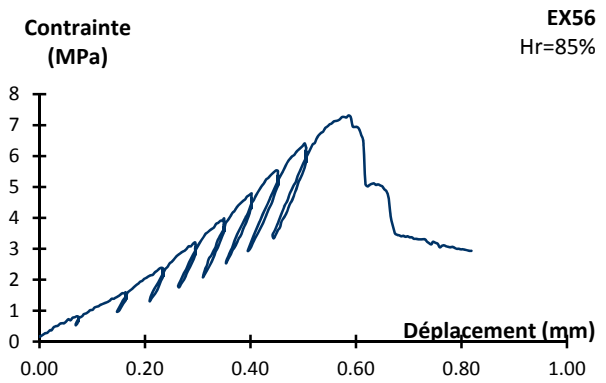
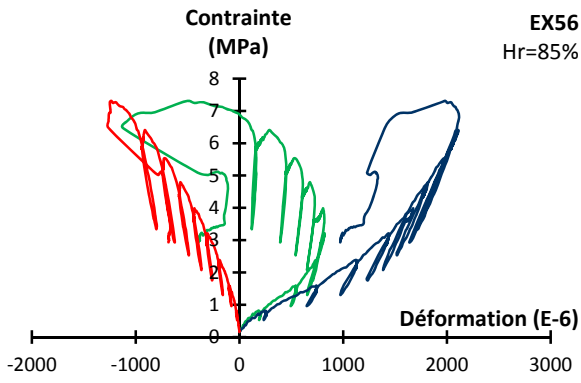


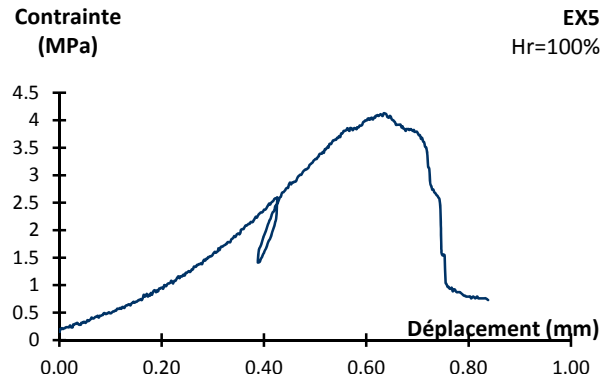
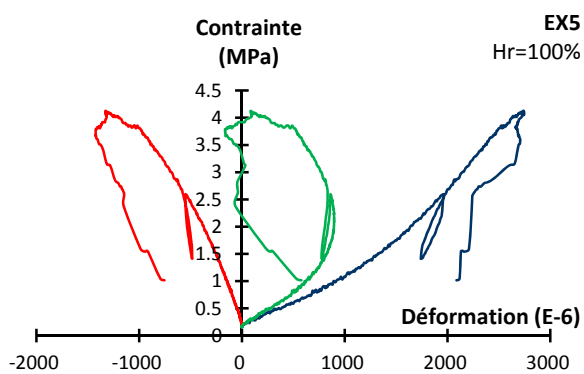
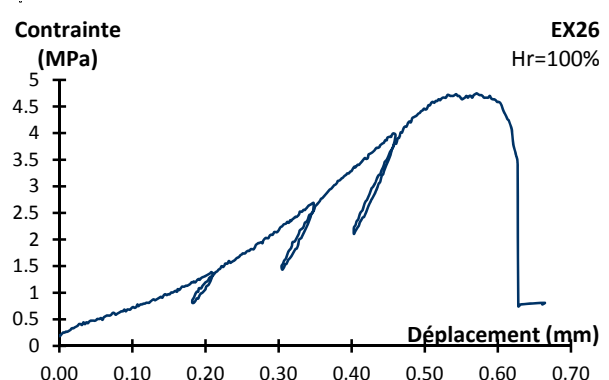
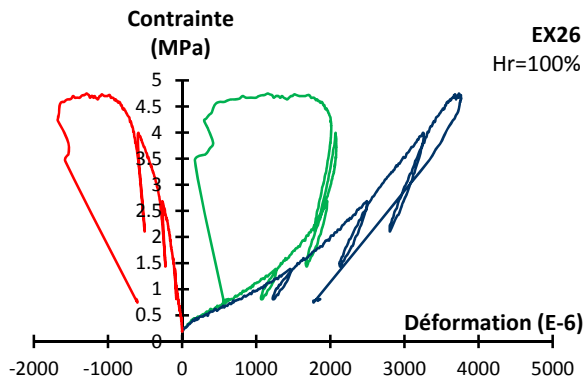
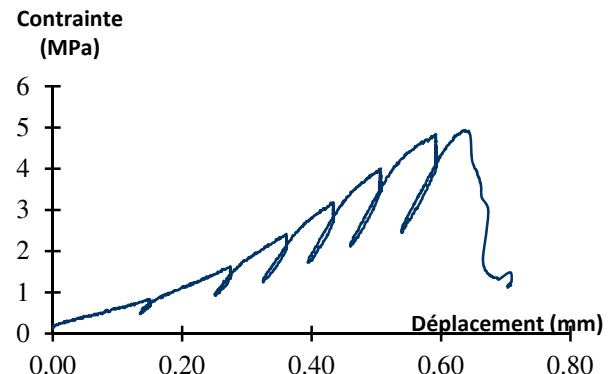
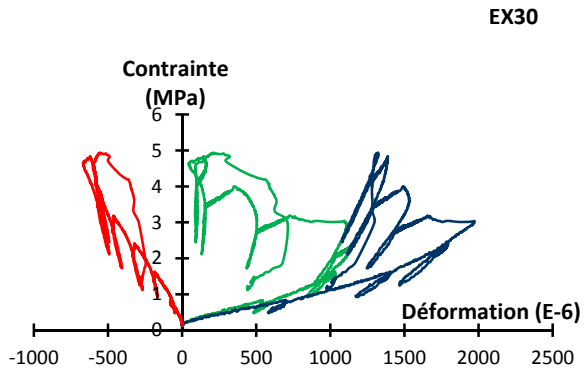
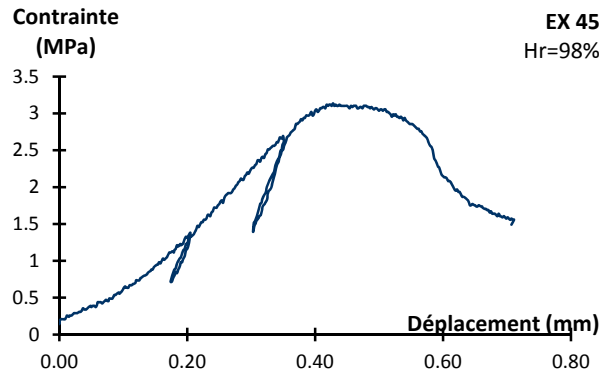
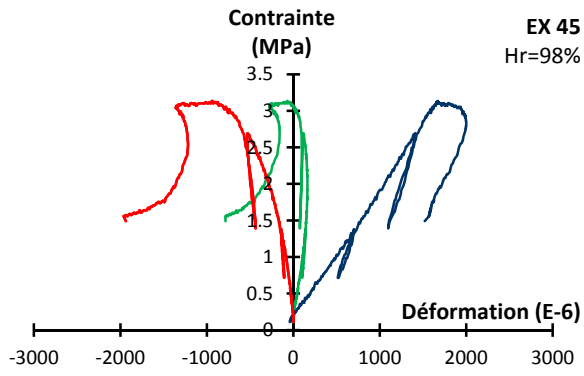




Craie d'Estreux







Photographies des échantillons après essais de compression uniaxiale
Craie de Saint-Martin-le-Noeud

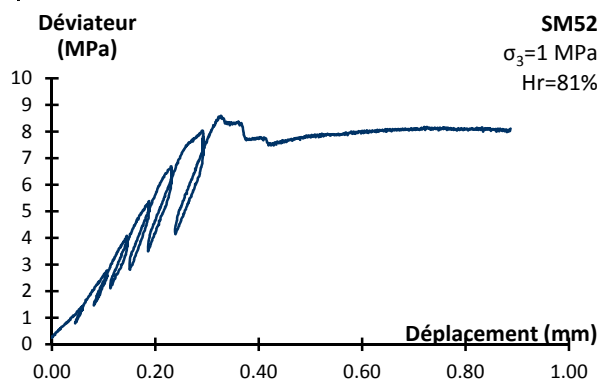
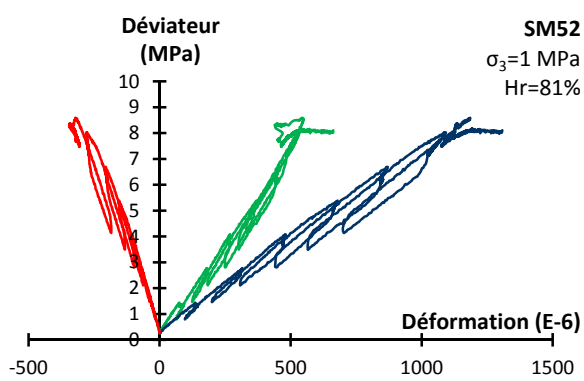
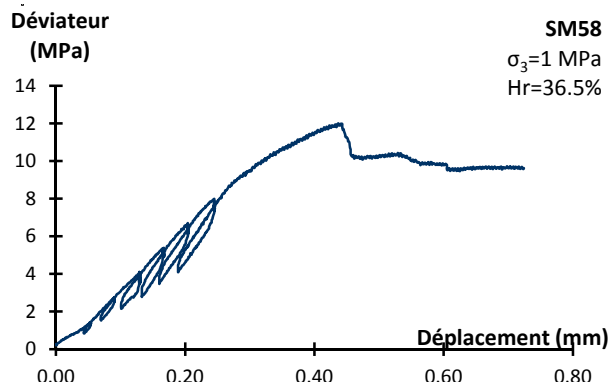
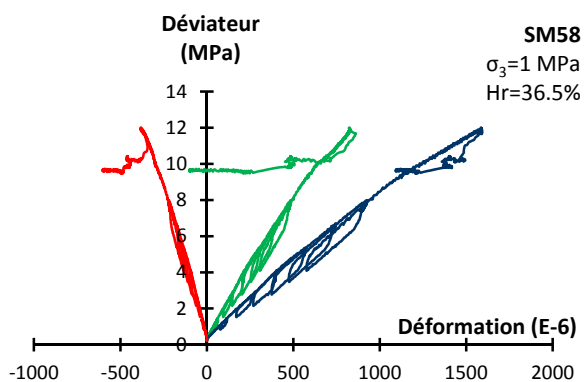
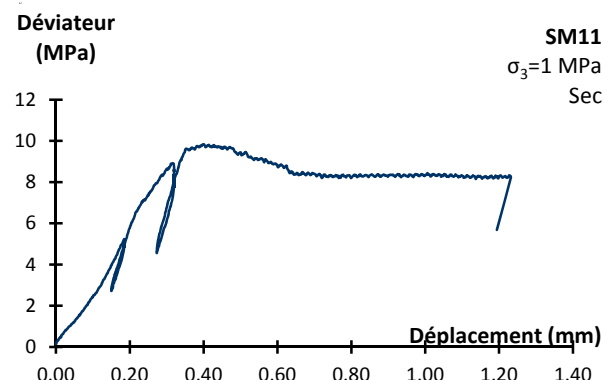
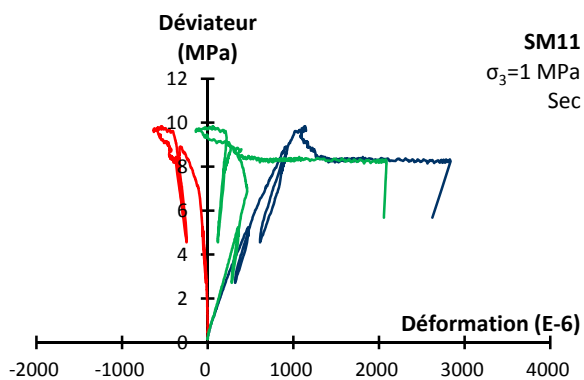
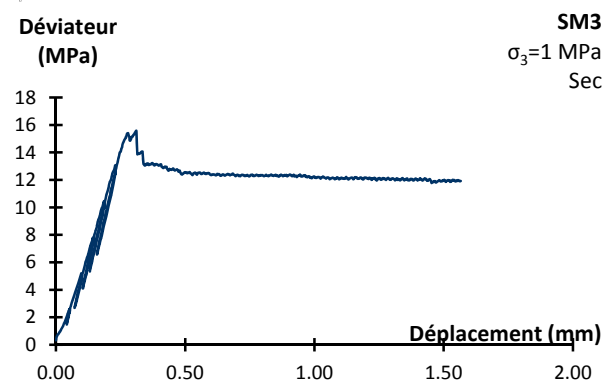
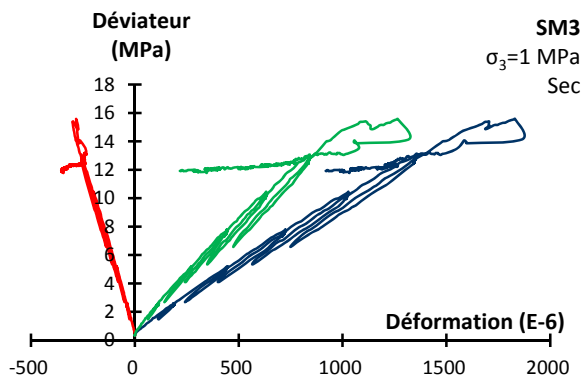


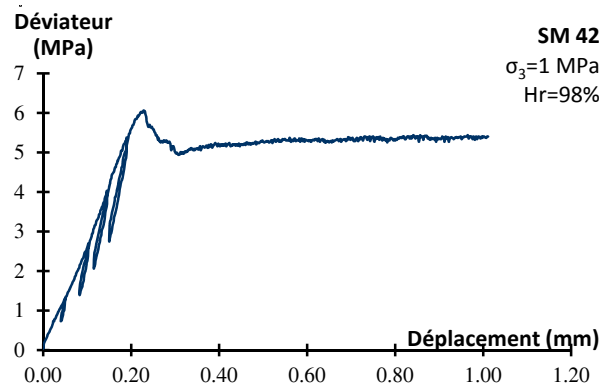
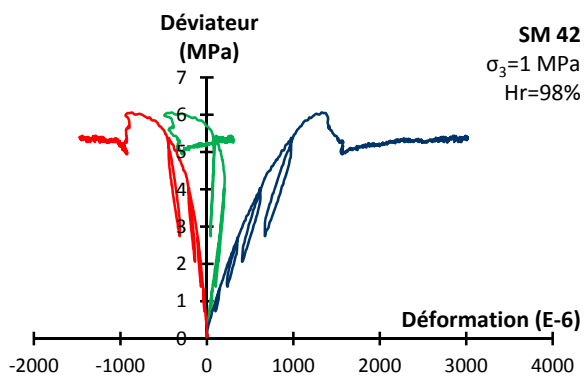
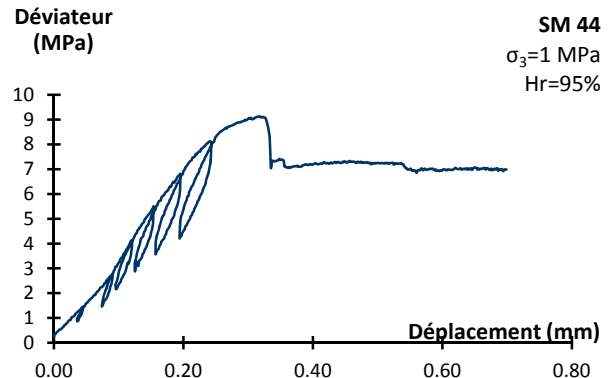
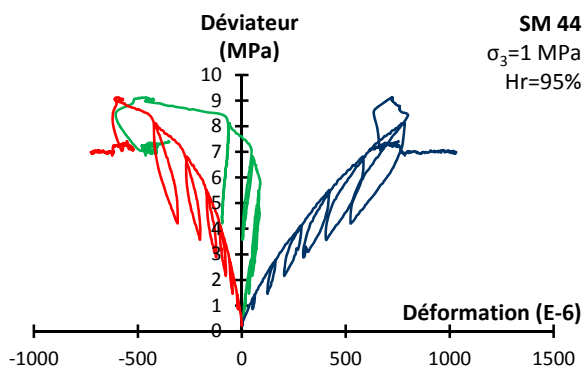
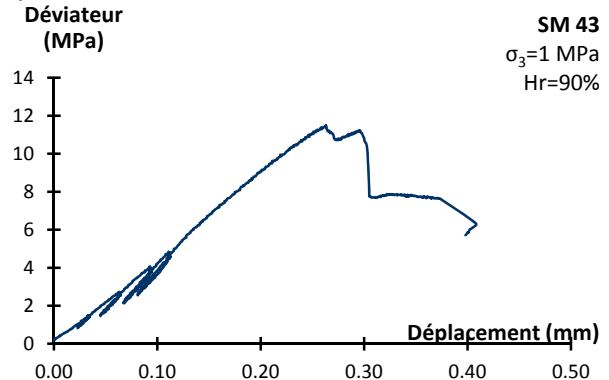
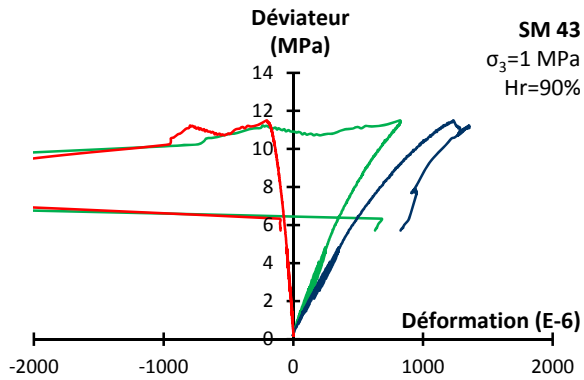
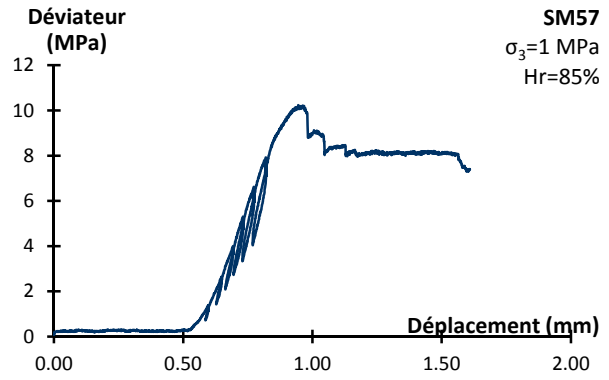
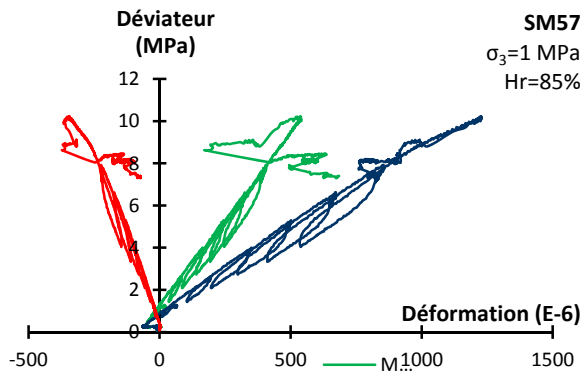
Craie d'Estreux

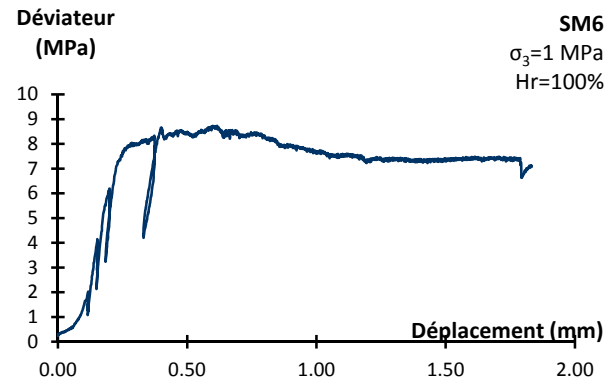
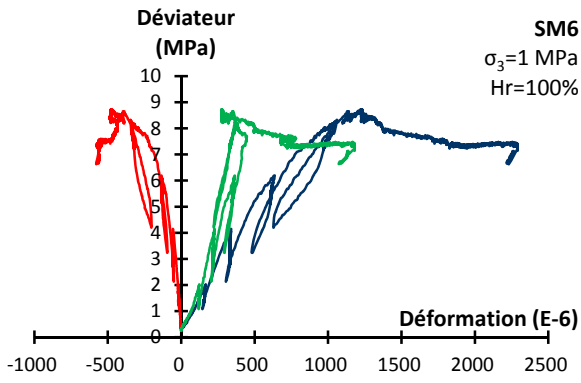
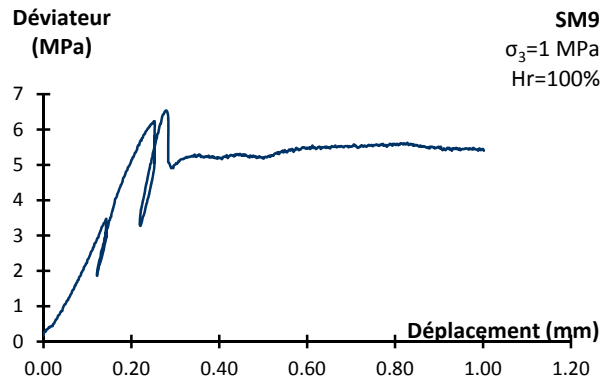
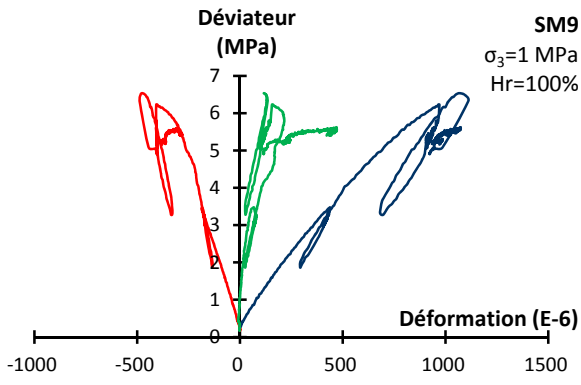


Courbes contrainte-déformation et contrainte-déplacement des essais de compression triaxiale à 1 MPa de confinement et à hygrométrie contrôlée

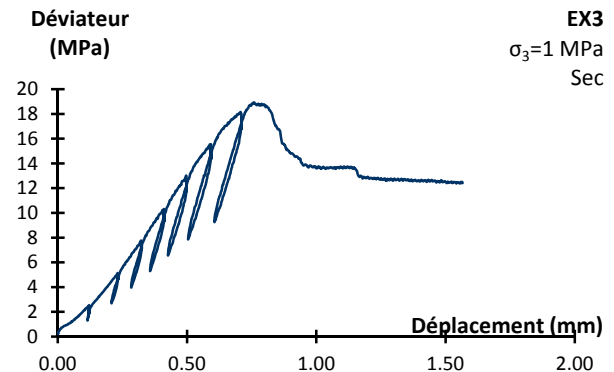
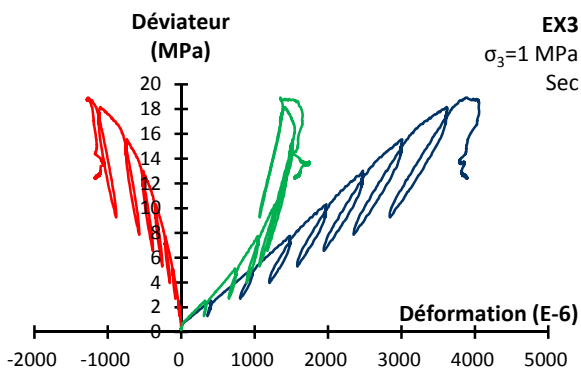
Craie de Saint-Martin-le-Noeud

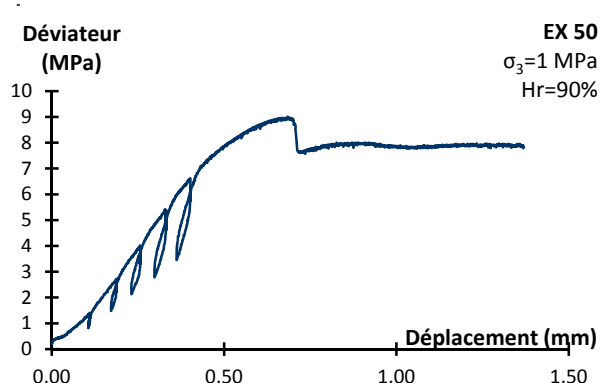
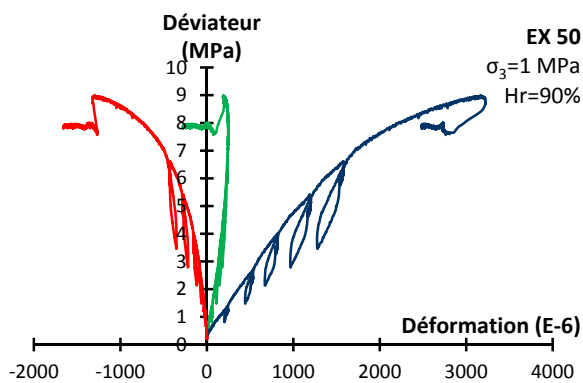
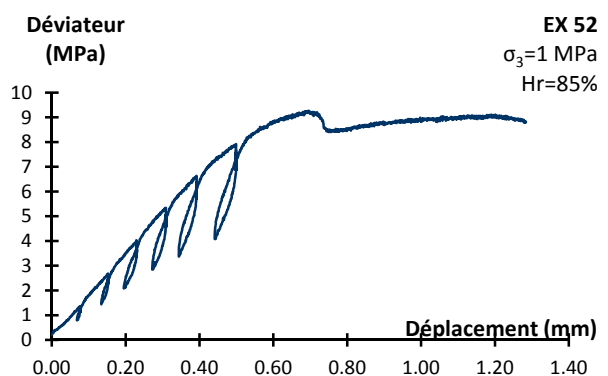
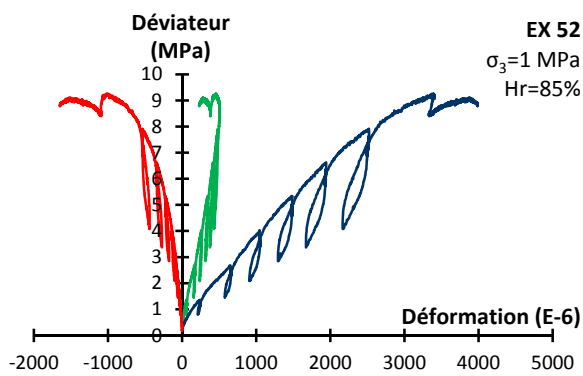
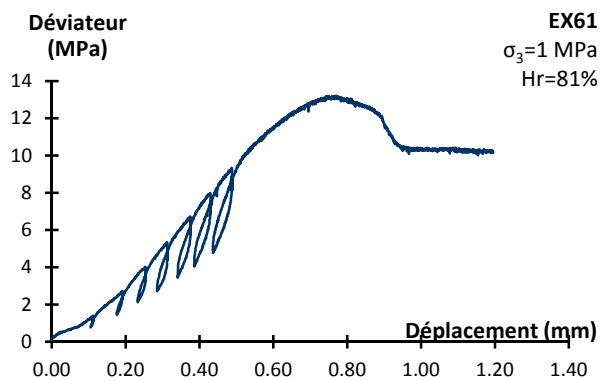
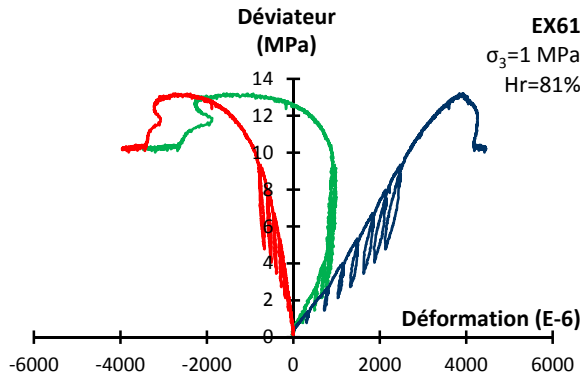
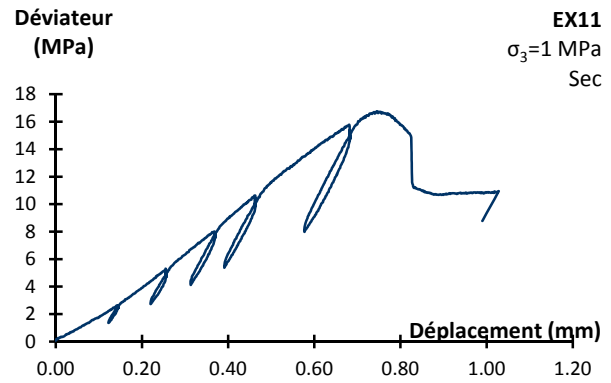
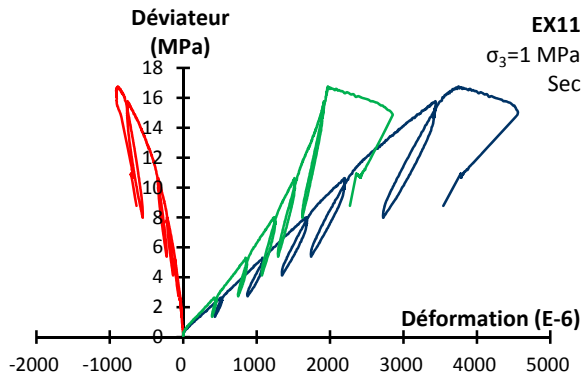


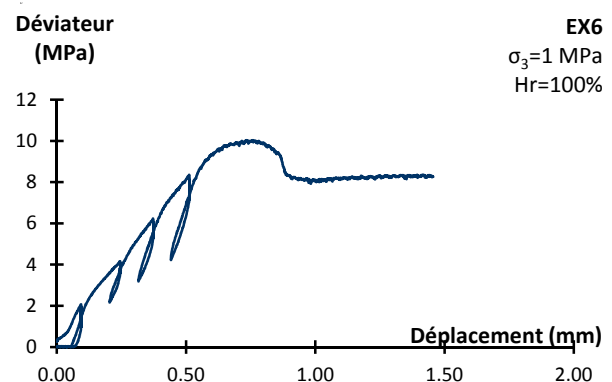
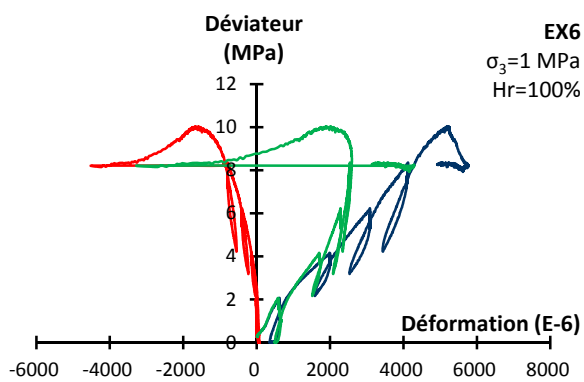
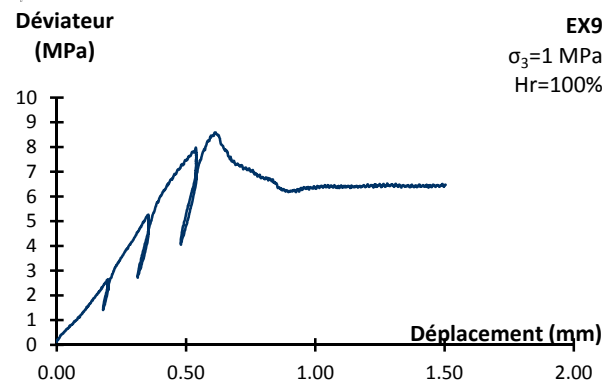
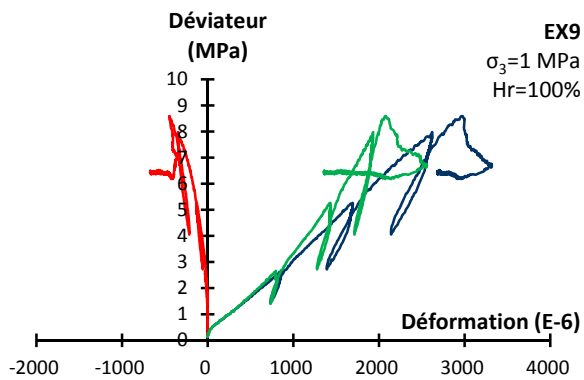
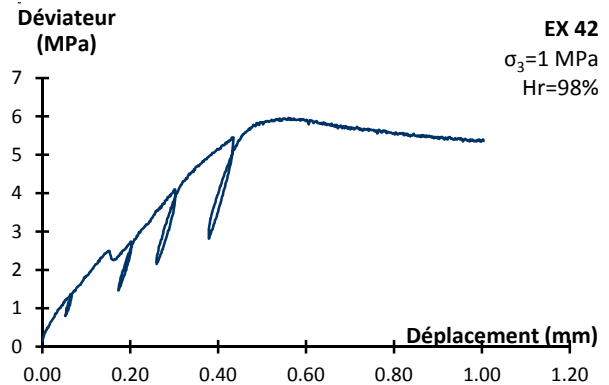
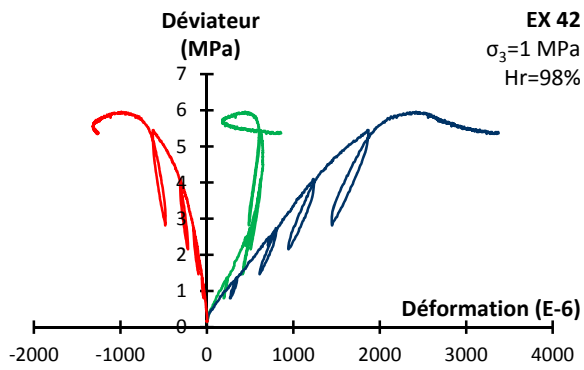
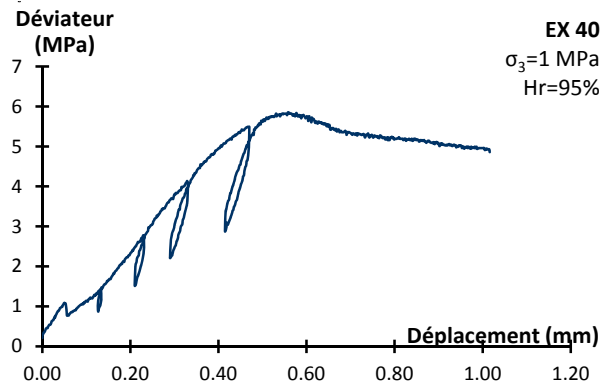
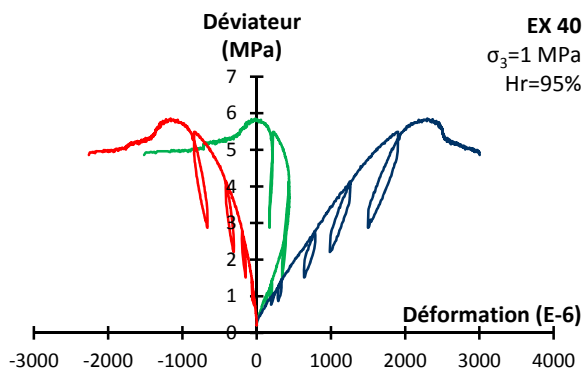




Craie d'Estreux





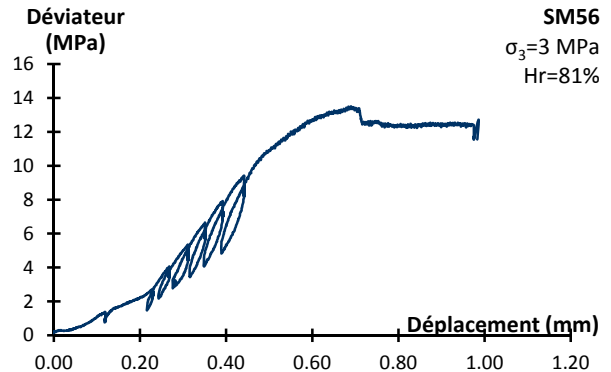
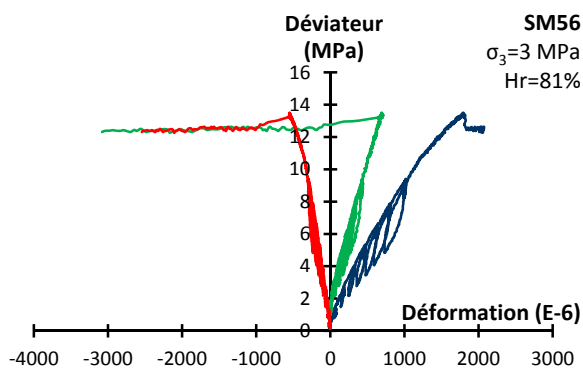
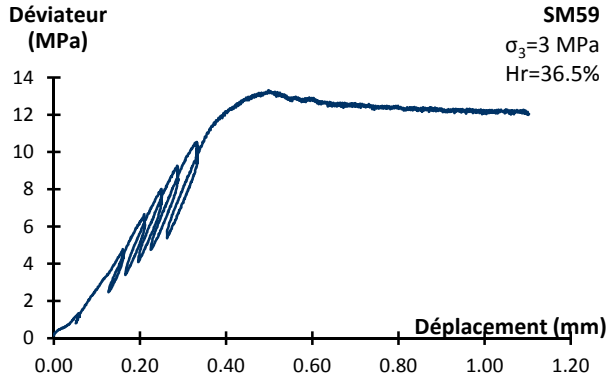
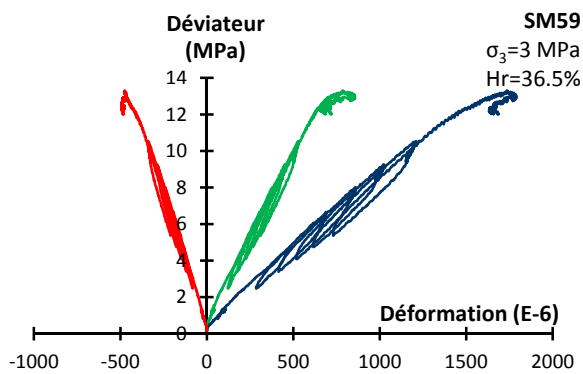
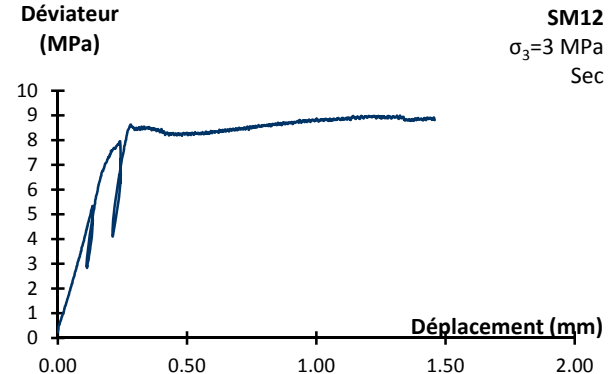
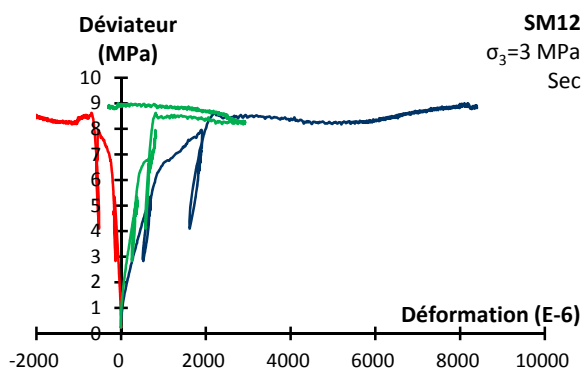
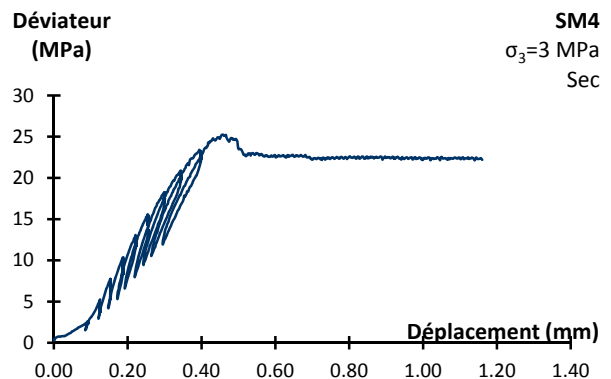
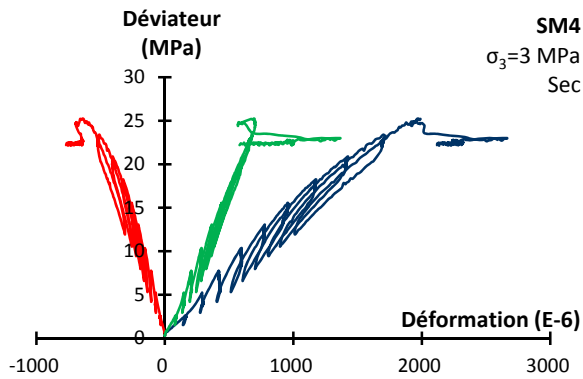


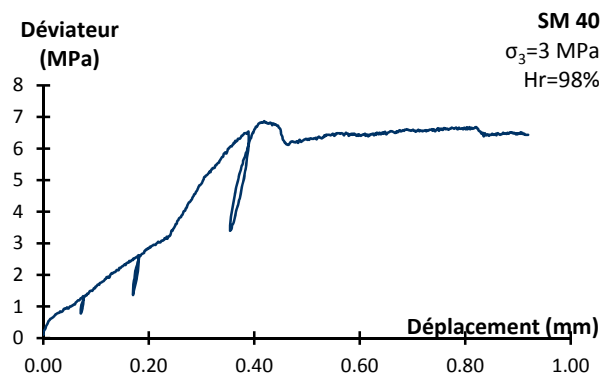
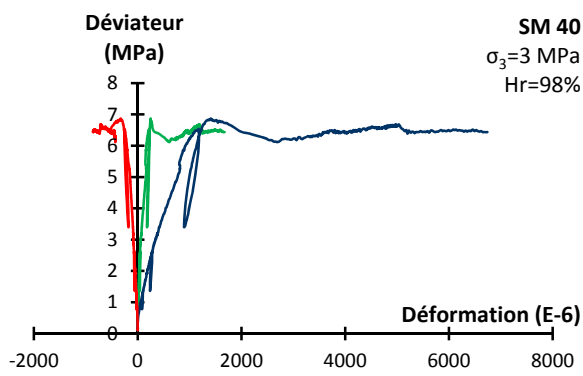
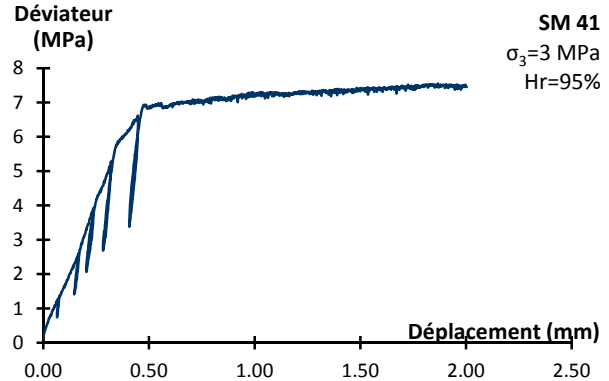
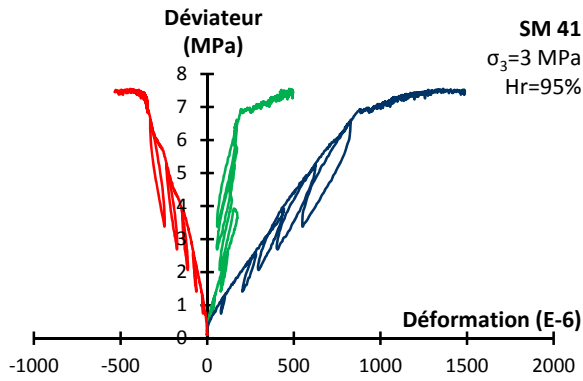
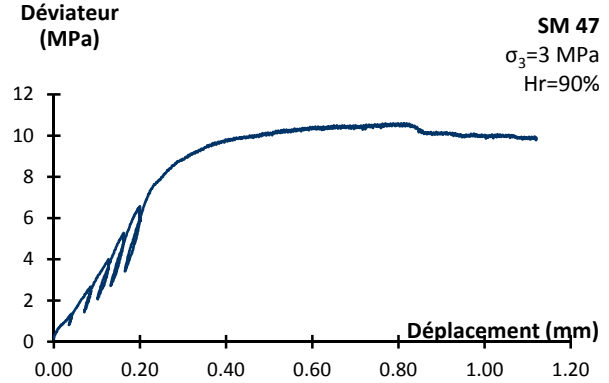
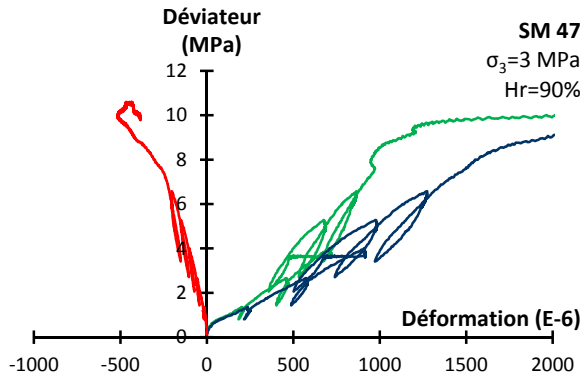
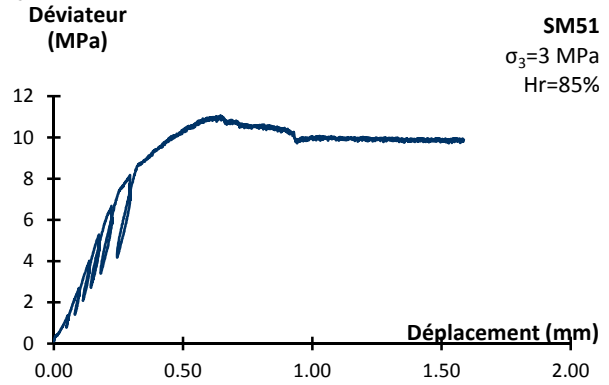
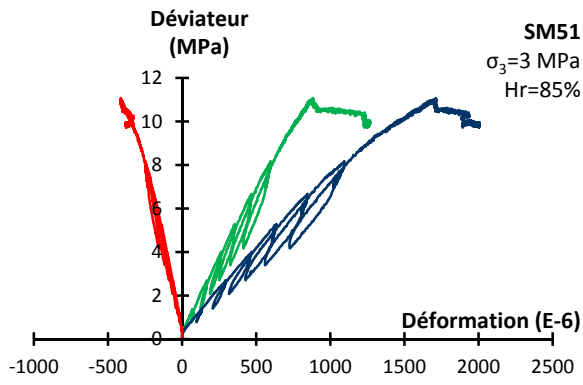
Craie d'Estreux

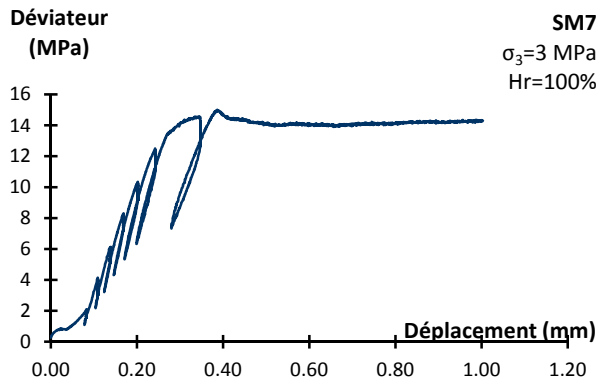
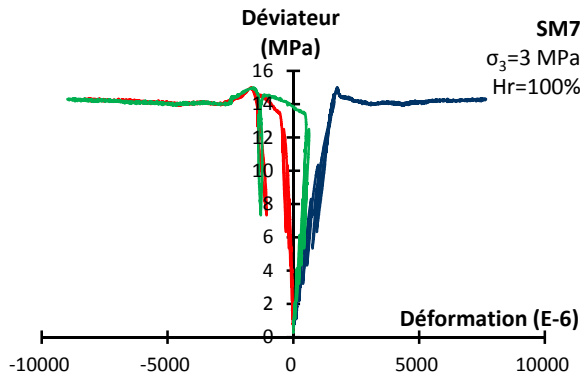
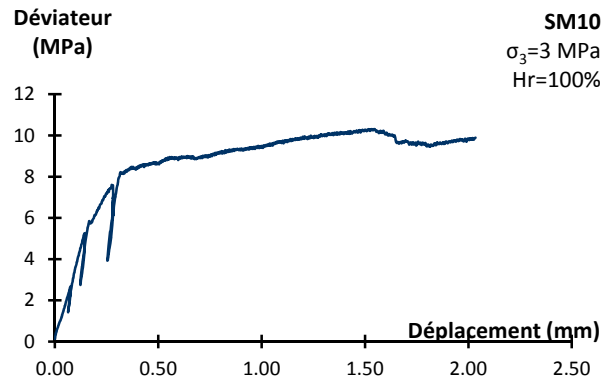
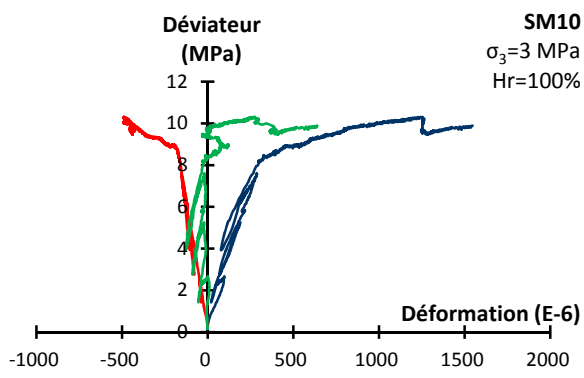
éch.	EX6	EX9	EX42	EX40	EX50	EX52	EX61	EX60	EX3	EX11
Hr %	100	100	98	95	90	85	81	36.5	50	50
Prog	cycle 50	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Relax 48	Cycle 50	Relax 48
L (mm)	99.43	99.86	99.65	99.70	99.73	99.71	99.58	1	99.43	99.54
σ _s (MPa)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Rc (MPa)	10.0	8.5	6.0	5.9	9.0	9.1	13.2	1	18.9	16.7
σ _t (MPa)	1.3	1.0	-	-	-	-	-	-	3.4	2.7
σ ₀ (MPa)	8.3	-	4.8	3.2	8.2	8.7	8.5	-	16.2	-
σ _R (MPa)	8.2	6.3	5.4	5.2	7.9	8.9	10.3	-	12.0	10.7
σ _r (MPa)	2.3	2.0	2.4	2.0	4.0	3.0	7.2	-	2.5	2.5
σ _{max} (MPa)	8.9	3.0	4.5	3.7	4.7	7.2	10.6	-	16.4	11.7
tg	E 2.60 F _u -40.90 G 0.06 H 1.22 I 0.99 J 0.18 K 1.76 L 5.00	E 3.00 F _u -23.40 G 0.13 H 1.33 I 1.34 J 0.46 K 1.23 L 6.60	E 3.54 F _u -21.82 G 0.16 H 1.52 I 1.75 J 0.73 K 1.99 L 6.48	E 4.42 F _u -17.90 G 0.25 H 1.77 I 2.91 J 1.73 K 1.67 L 6.50	E 4.57 F _u -30.06 G 0.15 H 1.98 I 2.19 J 0.87 K 1.04 L 11.88	E 6.18 F _u -45.04 G 0.14 H 2.72 I 2.84 J 1.03 K 1.36 L 9.98	E 2.96 F _u -18.59 G 0.16 H 1.28 I 1.45 J 0.60 K 1.51 L 8.80	E - F _u -	E - F _u -53.00	E 5.00 F _u -38.20
cycle 1	E 2.60 F _u -40.90 G 0.06 H 1.22 I 0.99 J 0.18 K 1.76 L 5.00	E 3.00 F _u -23.40 G 0.13 H 1.33 I 1.34 J 0.46 K 1.23 L 6.60	E 3.54 F _u -21.82 G 0.16 H 1.52 I 1.75 J 0.73 K 1.99 L 6.48	E 4.42 F _u -17.90 G 0.25 H 1.77 I 2.91 J 1.73 K 1.67 L 6.50	E 4.57 F _u -30.06 G 0.15 H 1.98 I 2.19 J 0.87 K 1.04 L 11.88	E 6.18 F _u -45.04 G 0.14 H 2.72 I 2.84 J 1.03 K 1.36 L 9.98	E 2.96 F _u -18.59 G 0.16 H 1.28 I 1.45 J 0.60 K 1.51 L 8.80	E - F _u -	E - F _u -53.00	E 5.00 F _u -38.20
cycle 2	E 4.70 F _u -18.00 G 0.26 H 1.86 I 3.01 J 1.91 K 4.12	E 6.00 F _u -28.60 G 0.21 H 2.48 I 3.85 J 2.23 K 3.94	E 5.41 F _u -19.19 G 0.28 H 2.11 I 4.13 J 2.04 K 3.69	E 7.95 F _u -31.66 G 0.25 H 3.18 I 5.32 J 3.18 K 4.03	E 9.31 F _u -36.94 G 0.25 H 3.72 I 6.26 K 4.21	E 5.36 F _u -27.04 G 0.20 H 2.24 I 2.96 K 3.44	E 10.30 F _u -49.88 G 0.21 H 2.21 I 5.85 K 7.68	E - F _u -	E - F _u -56.20	E 11.50 F _u -65.20
cycle 3	E 4.20 F _u -15.70 G 0.27 H 1.66 I 3.01 J 1.91 K 4.12	E 6.00 F _u -25.00 G 0.24 H 2.42 I 3.85 J 2.23 K 3.94	E 5.32 F _u -17.50 G 0.30 H 2.04 I 4.52 J 2.31 K 3.69	E 6.13 F _u -18.88 G 0.32 H 3.21 I 5.83 J 3.44	E 7.53 F _u -25.44 G 0.30 H 2.91 I 6.15	E 5.87 F _u -27.18 G 0.22 H 2.41 I 3.44	E 12.34 F _u -53.15 G 0.23 H 2.51 I 7.68	E - F _u -	E - F _u -59.60	E 11.00 F _u -39.60
cycle 4	E 4.00 F _u -14.50 G 0.28 H 1.57 I 2.97 J 1.93 K 4.32	E - F _u -15.05	E 5.30 F _u -13.62 G 0.35 H 1.96 I 4.52 J 3.18 K 3.96	E 5.38 F _u -13.62 G 0.35 H 1.96 I 4.52 J 3.18 K 3.96	E 6.82 F _u -24.16 G 0.28 H 2.66 I 5.22 J 4.32	E 5.76 F _u -25.73 G 0.22 H 2.35 I 3.48	E 9.88 F _u -51.97 G 0.19 H 2.15 I 5.31	E - F _u -	E - F _u -41.10	E 10.60 F _u -39.30
cycle 5	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E 4.93 F _u -10.85 G 0.45 H 1.69 I 4.81 J 3.52	E 6.80 F _u -22.80 G 0.30 H 2.62 I 5.62 J 4.90	E 6.10 F _u -22.93 G 0.27 H 2.41 I 3.43 K 4.35	E 9.31 F _u -26.46 G 0.35 H 2.34 I 10.47	E - F _u -	E - F _u -37.20	E 10.60 F _u -30.00
cycle 6	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -
cycle 7	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -
cycle 8	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -
cycle 9	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -	E - F _u -
Moyenne	E 4.48	E 6.20	E 5.63	E 6.49	E 8.47	E 6.49	E 9.76	E -	E 11.78	E 9.72
F _u	-17.98	-29.20	-20.74	-22.46	-30.57	-30.90	-37.69	-	-51.75	-44.78
v	0.25	0.21	0.29	0.31	0.28	0.23	0.28	-	0.24	0.23
G	1.79	2.55	2.20	2.50	3.31	2.66	3.84	-	4.77	3.95
K	3.04	3.63	4.58	6.02	6.39	4.00	8.07	-	7.71	6.23
λ	1.84	1.93	3.12	4.35	4.19	2.22	5.51	-	4.53	3.59
F _L	3.96	3.79	3.71	3.96	4.03	3.50	4.77	-	8.06	4.86
Ecart-type	E 0.46	E 0.35	E 0.57	E 1.08	E 2.16	E 1.73	E 1.28	E -	E 2.45	E 1.14
E _{lat}	4.08	4.53	7.19	7.87	9.16	15.92	13.35	-	22.07	13.39
v	0.03	0.02	0.06	0.07	0.02	0.05	0.07	-	0.05	0.06
G	0.22	0.18	0.33	0.53	0.88	0.81	0.66	-	1.17	0.47
K	0.17	0.20	0.99	1.78	1.37	0.82	2.47	-	1.03	1.39
λ	0.23	0.27	1.16	2.05	0.84	0.71	2.75	-	1.15	1.38
E _L	0.32	0.33	0.17	0.30	0.60	0.52	0.71	-	1.06	0.69

Courbes contrainte-déformation et contrainte-déplacement des essais de compression triaxiale à 3 MPa de confinement et à hygrométrie contrôlée

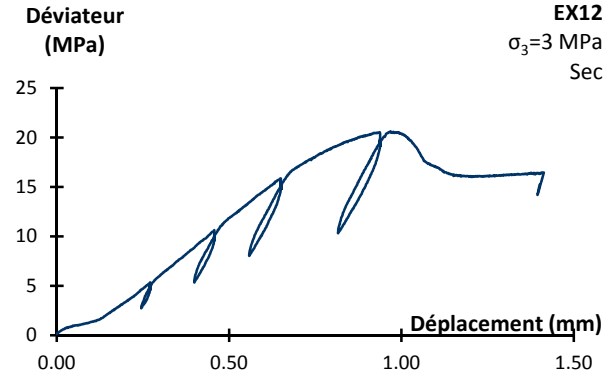
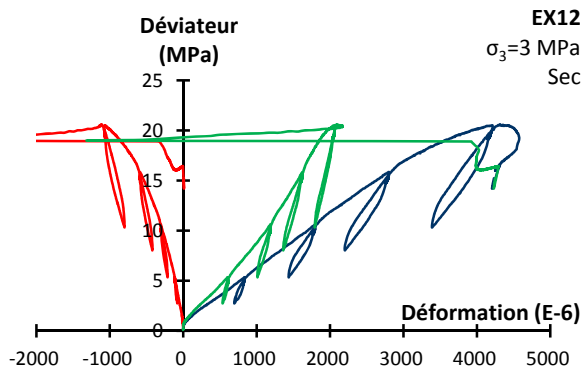
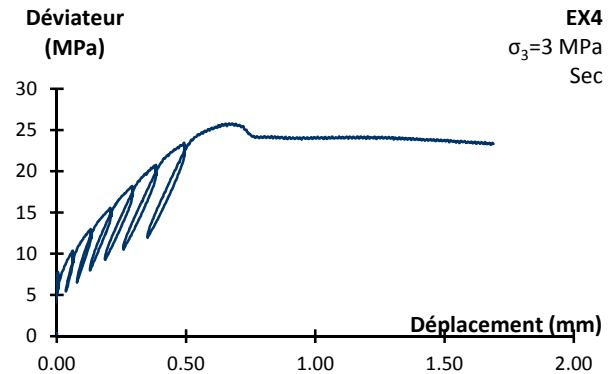
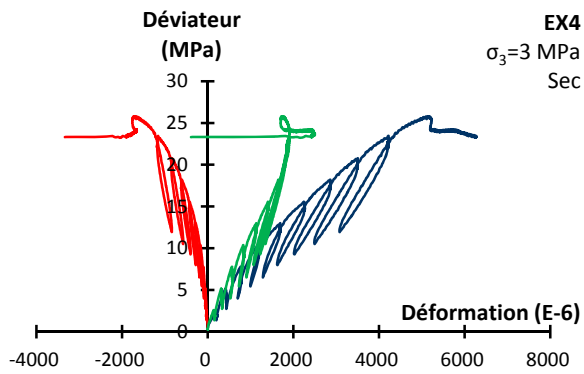
Craie de Saint-Martin-le-Noeud

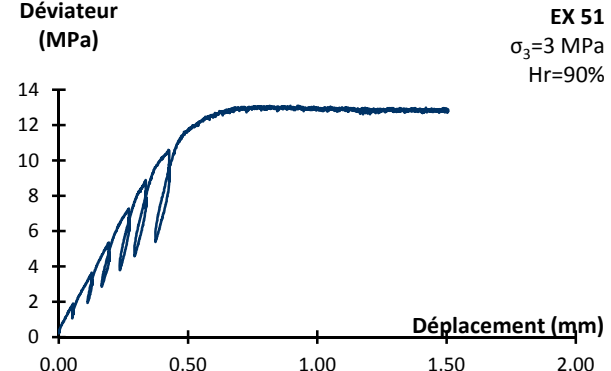
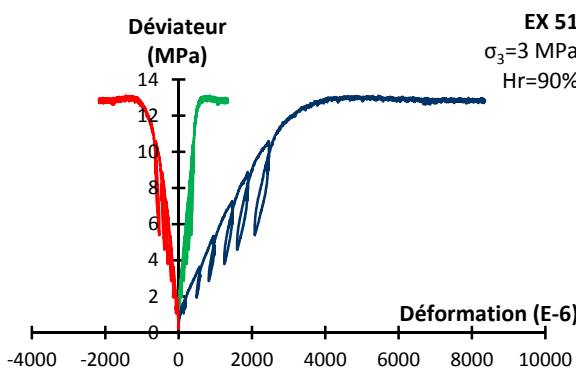
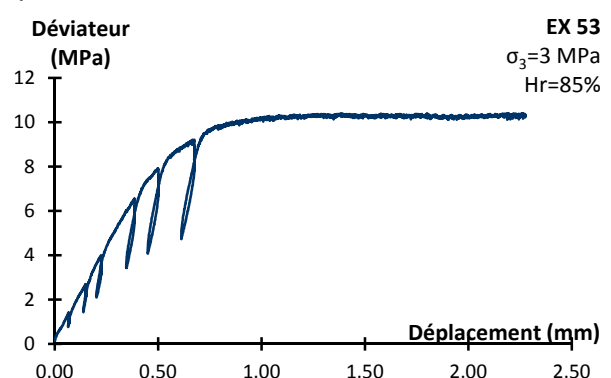
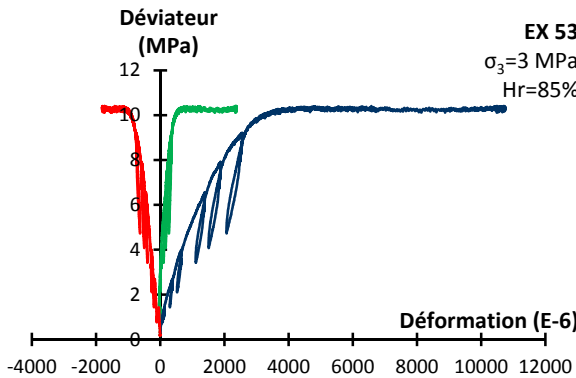
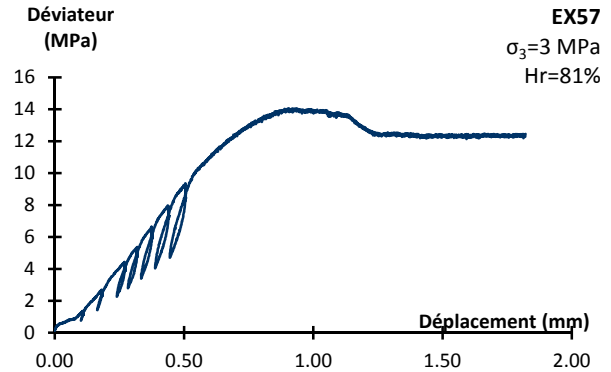
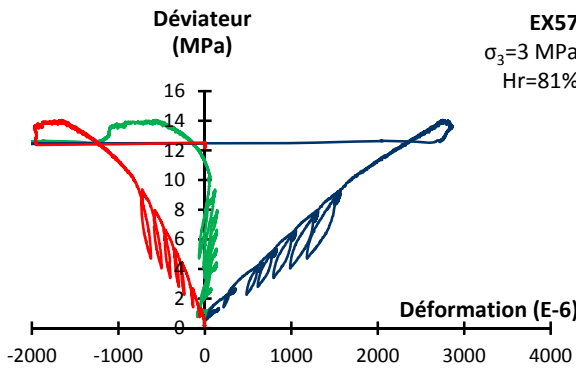
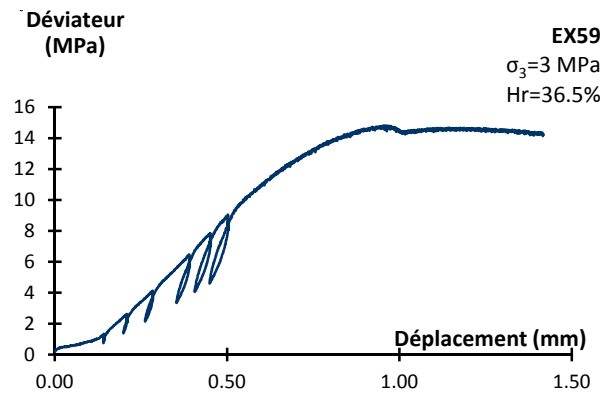
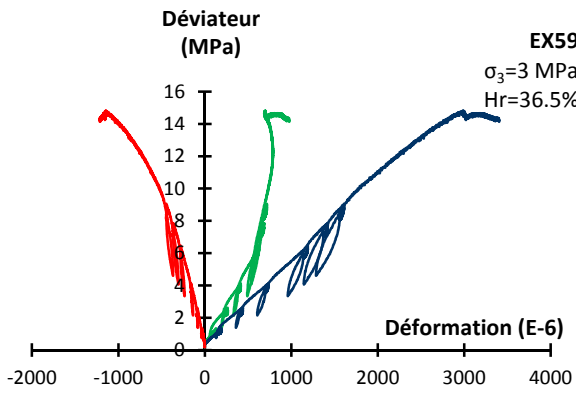


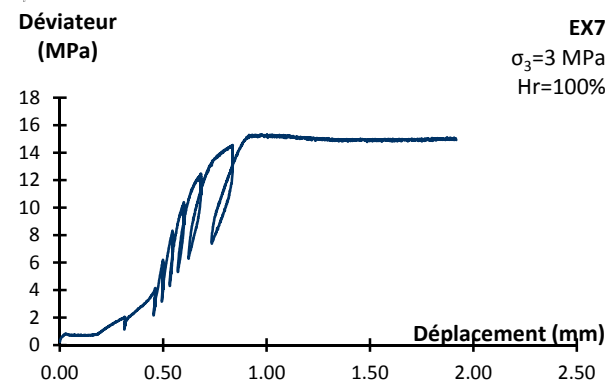
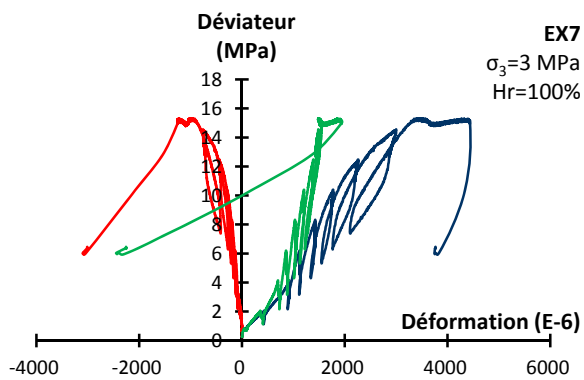
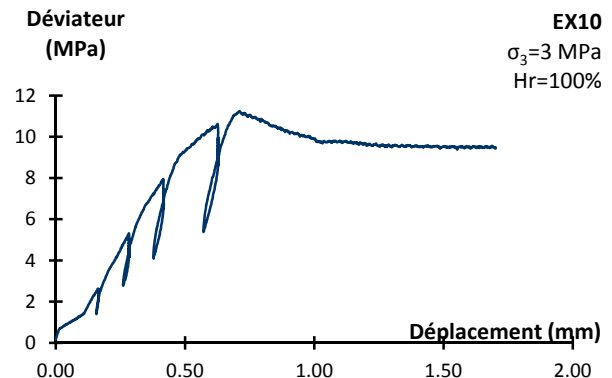
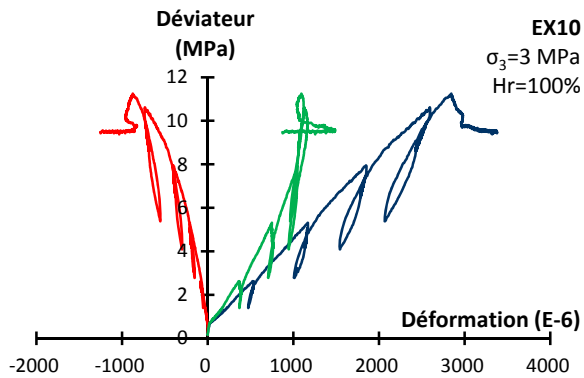
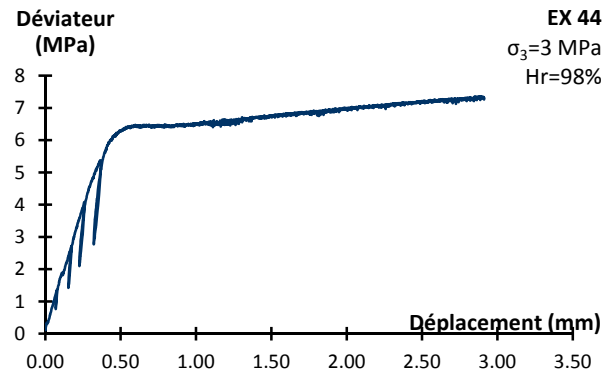
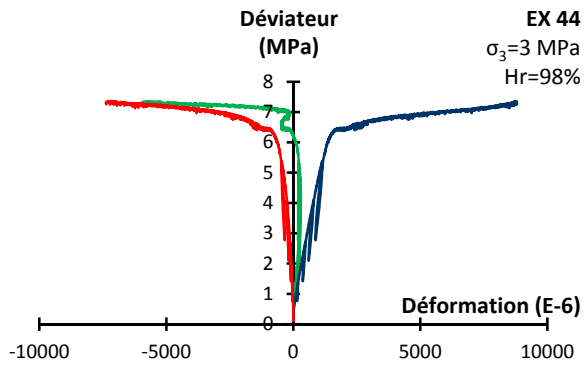
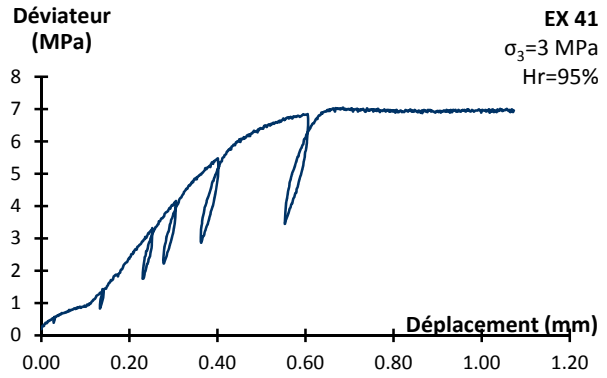
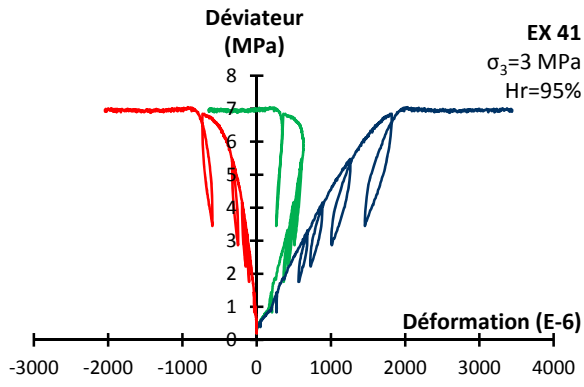




Craie d'Estreux



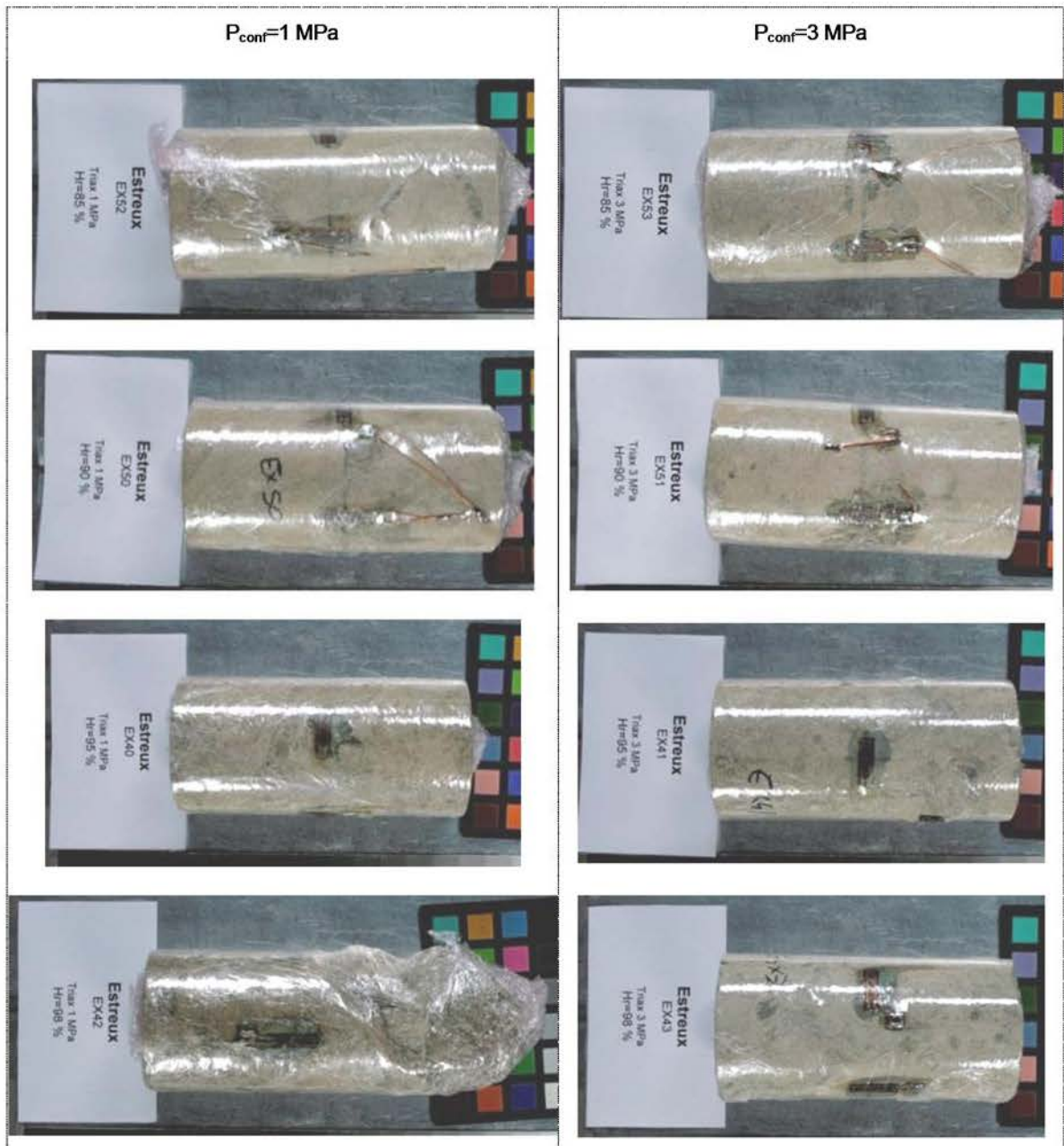




Photographies des échantillons après essais de compression triaxiale
 Craie de Saint-Martin-le-Noeud

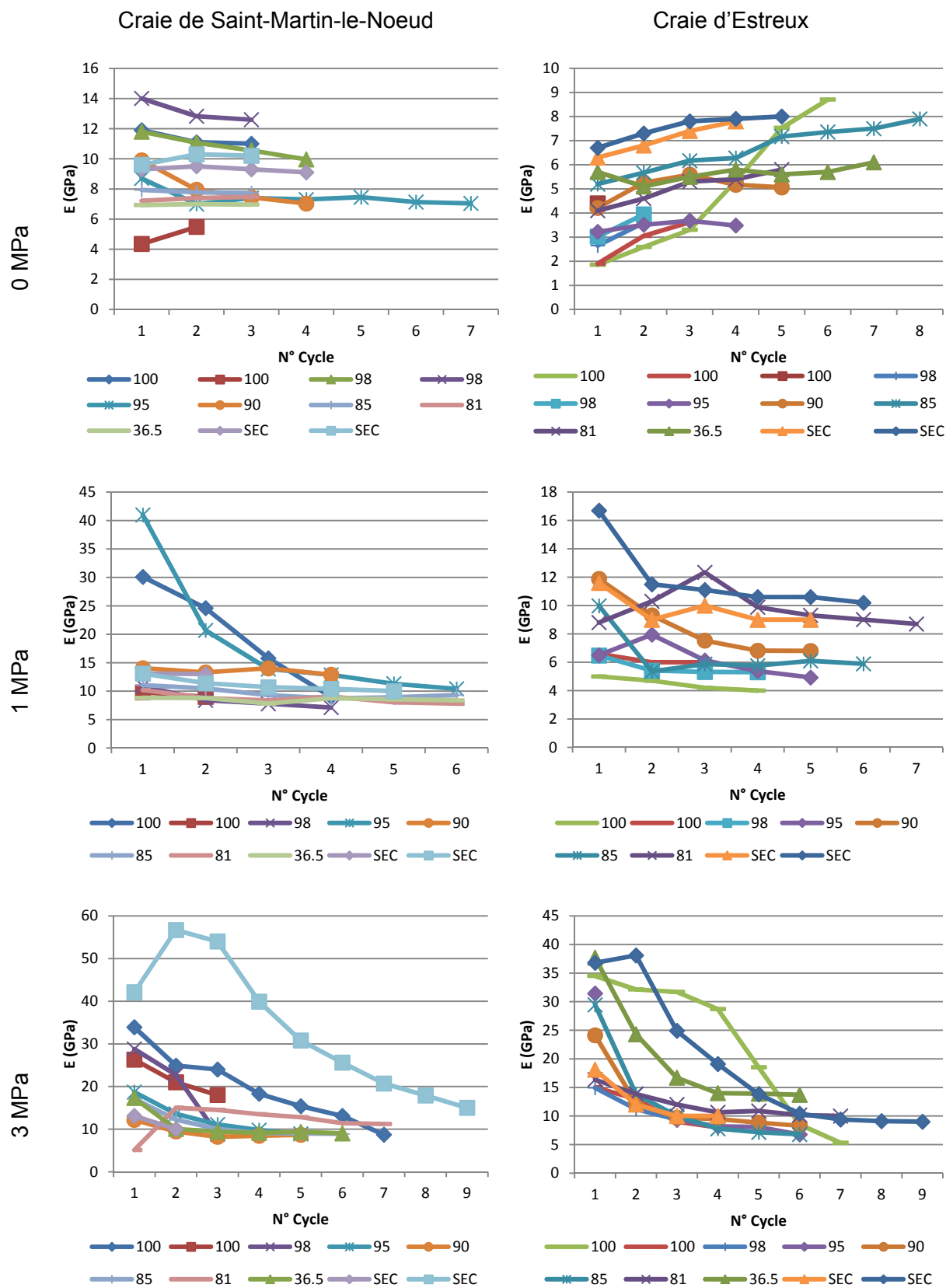


Craie d'Estreux



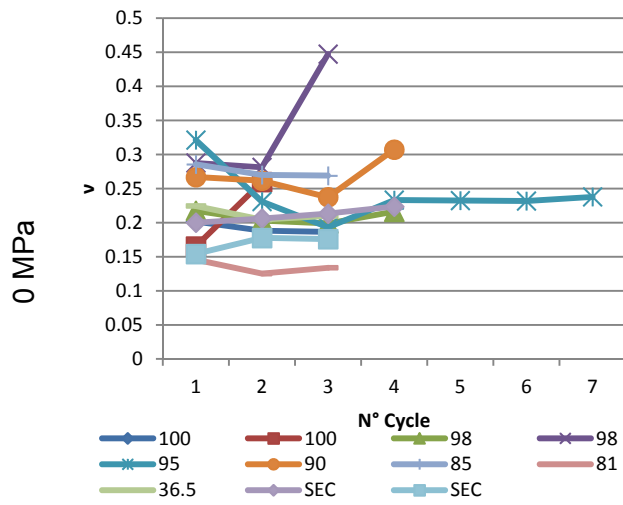
Evolution du module de Young E, du coefficient de Poisson ν et du module E_L de l'enveloppe en fonction des cycles de chargement-déchargement, du confinement et de l'hygrométrie.

Module de Young

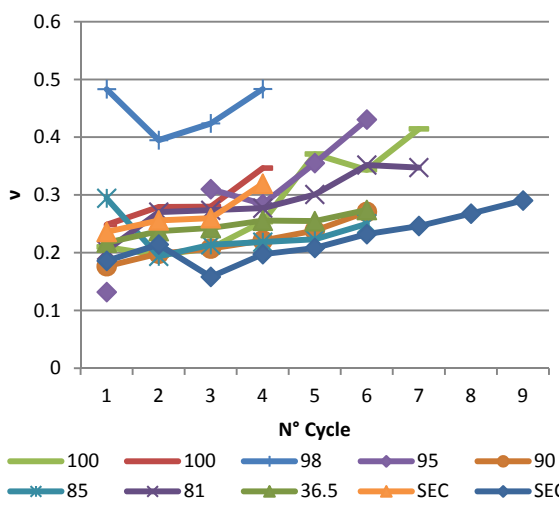
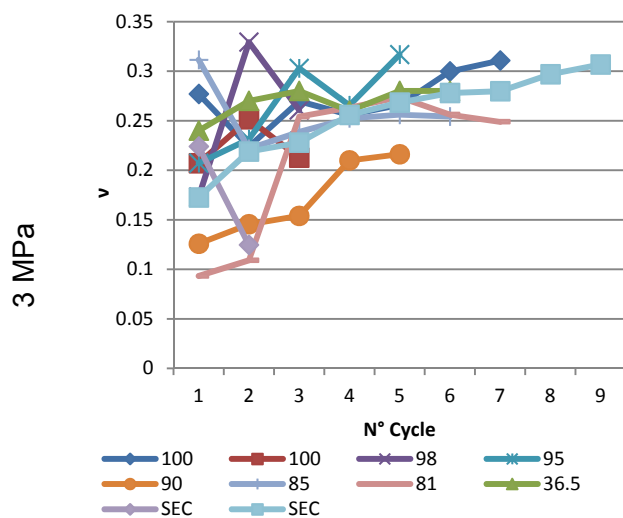
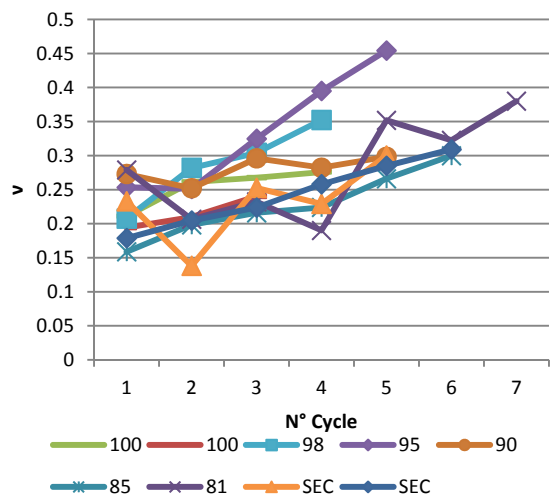
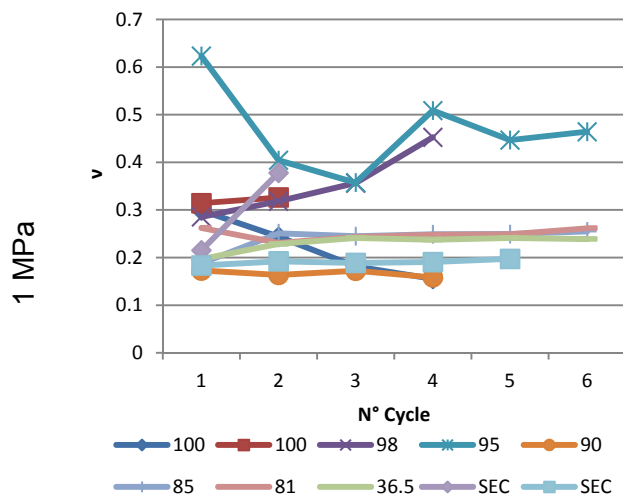
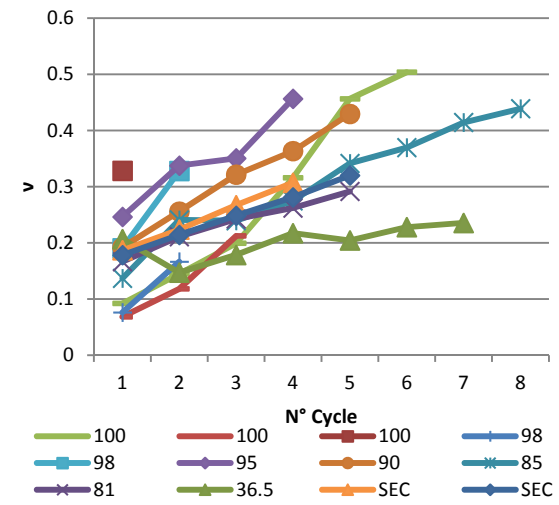


Coefficient de Poisson

Craie de Saint-Martin-le-Noëud

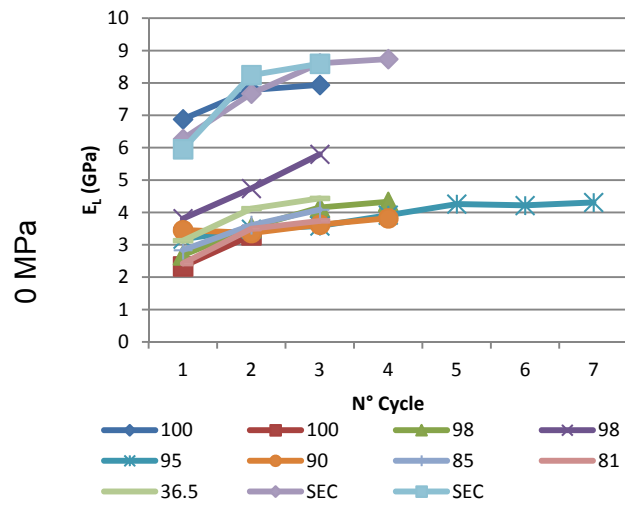


Craie d'Estreux

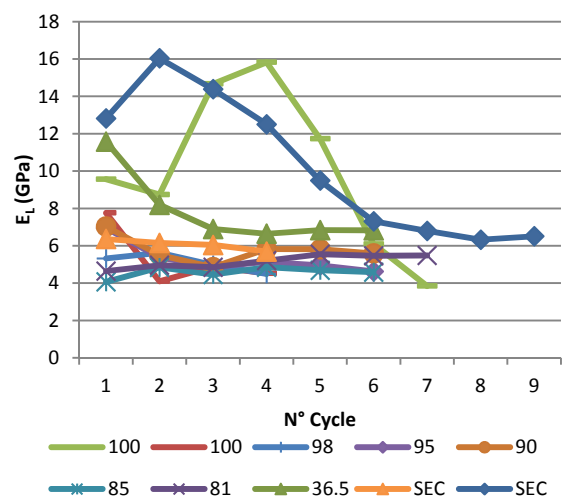
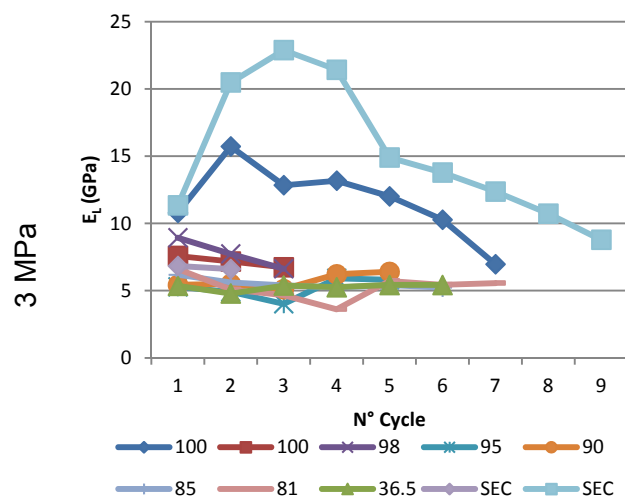
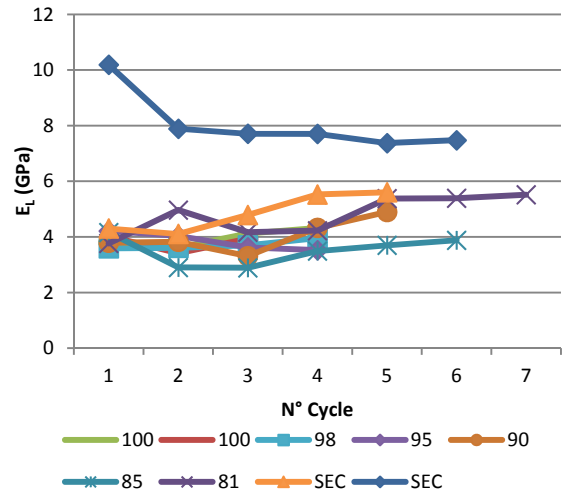
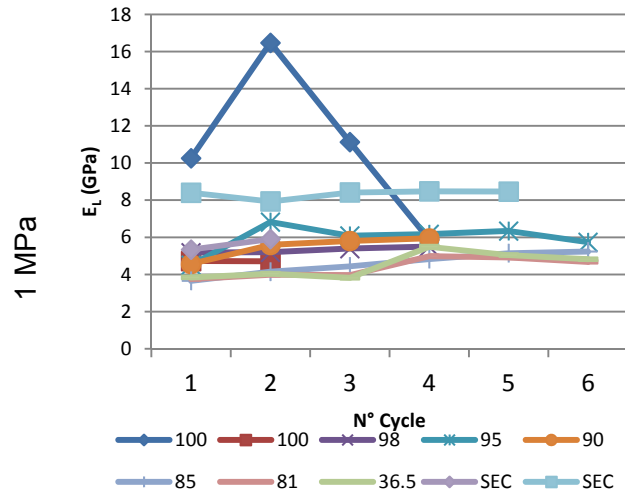
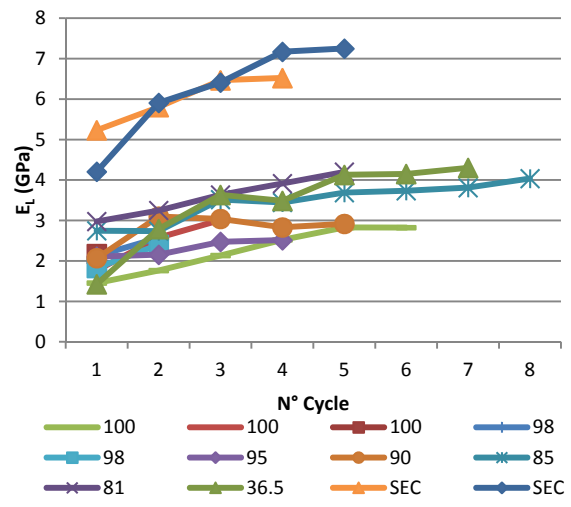


Module de l'enveloppe

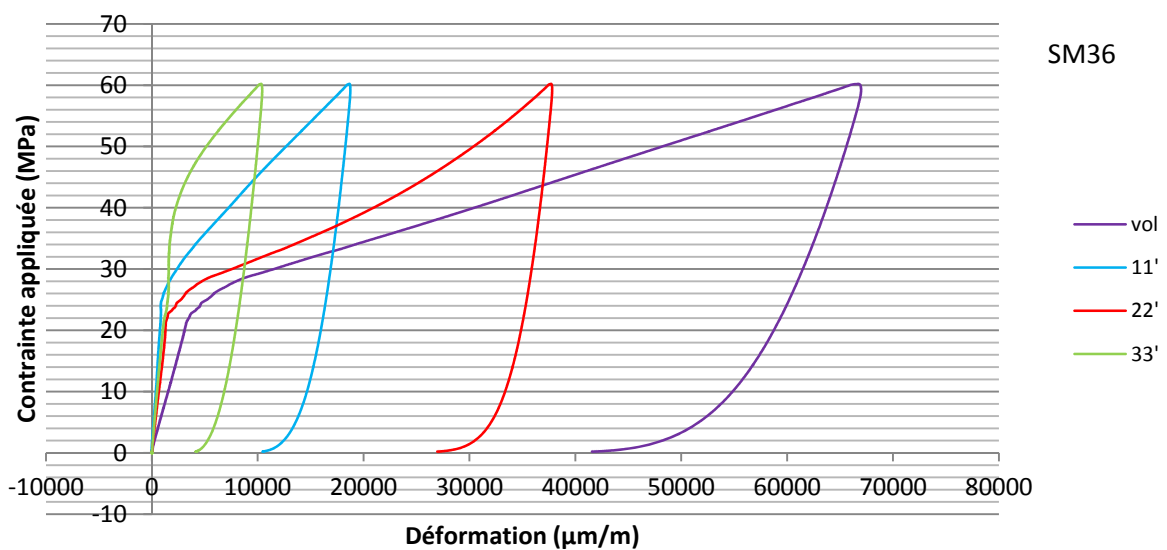
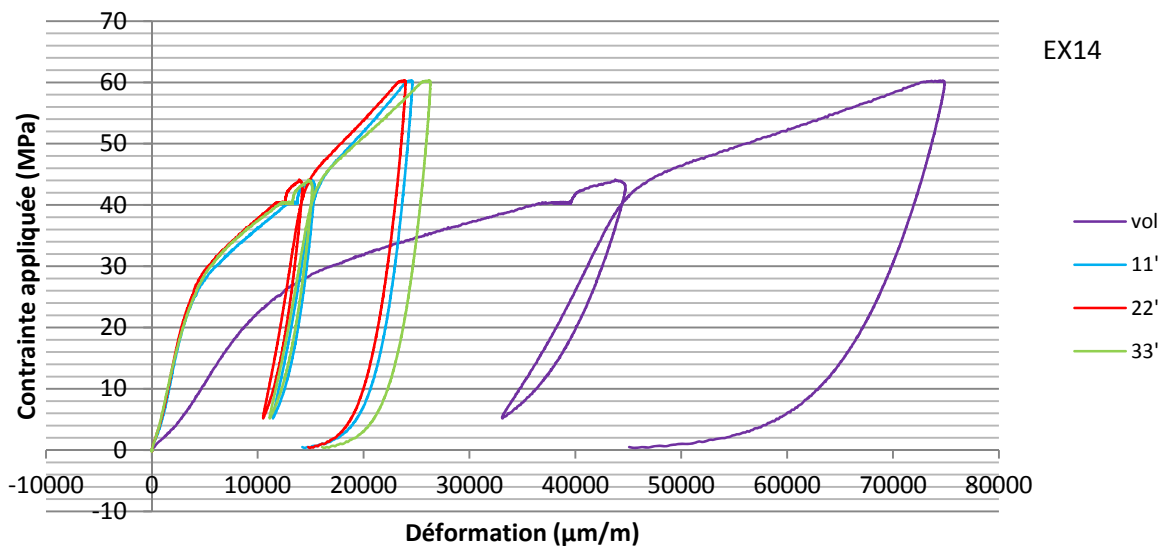
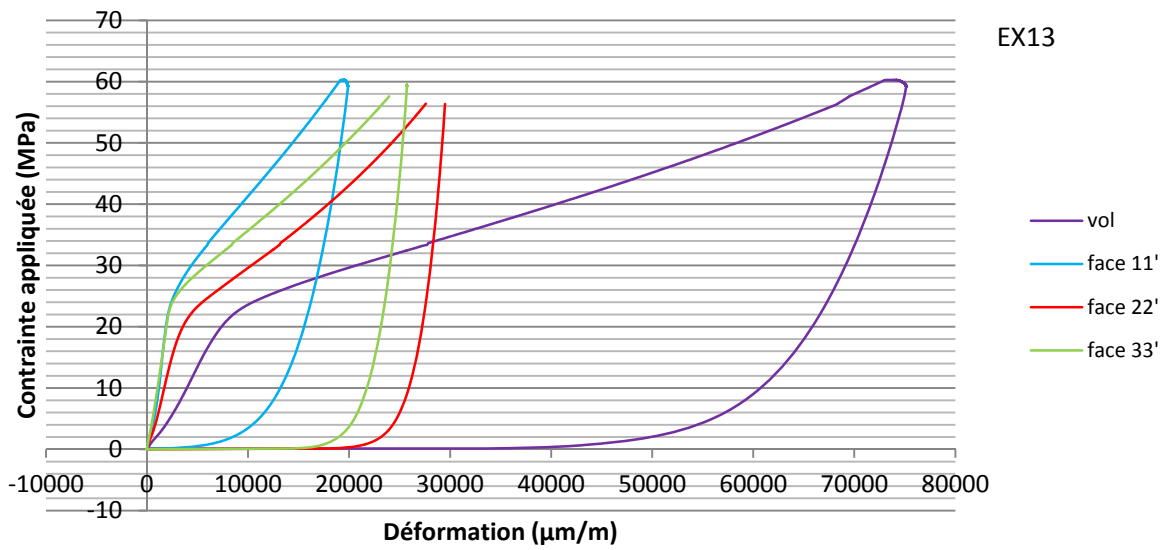
Craie de Saint-Martin-le-Noeud

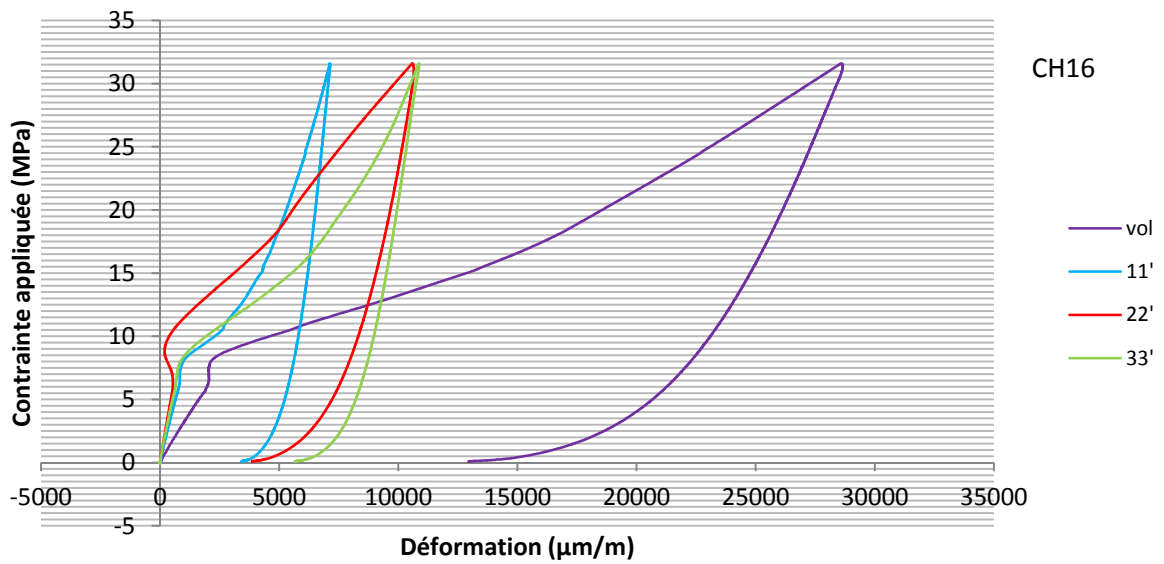
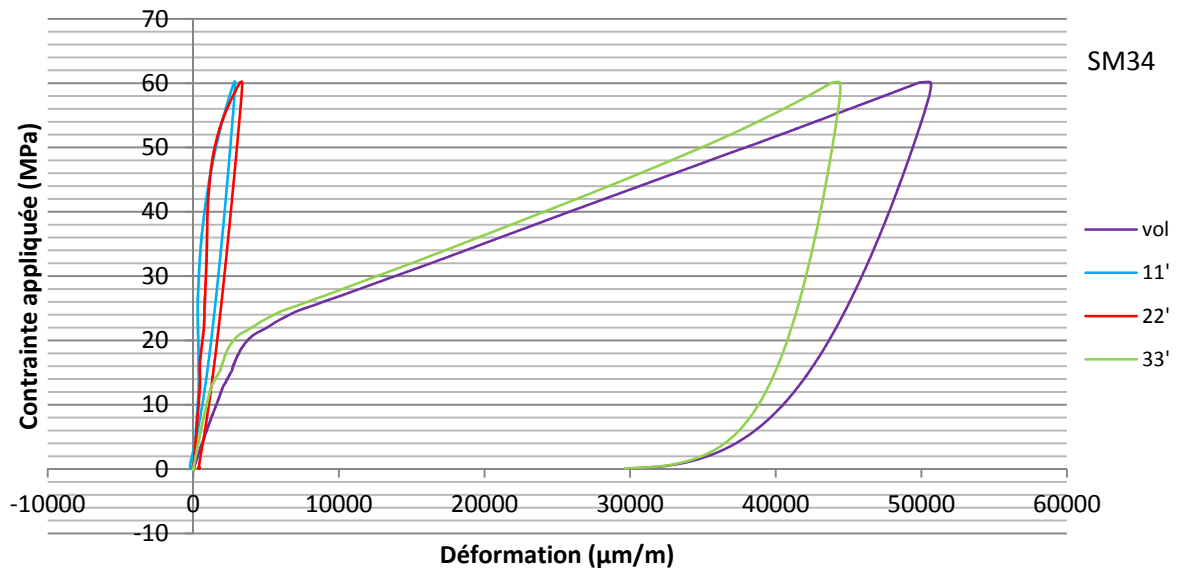


Craie d'Estreux



Courbes contrainte déformation des essais de compression isotrope sur cube





Annexe C :

Courbes d'essais et résultats

Propriétés mécaniques LT

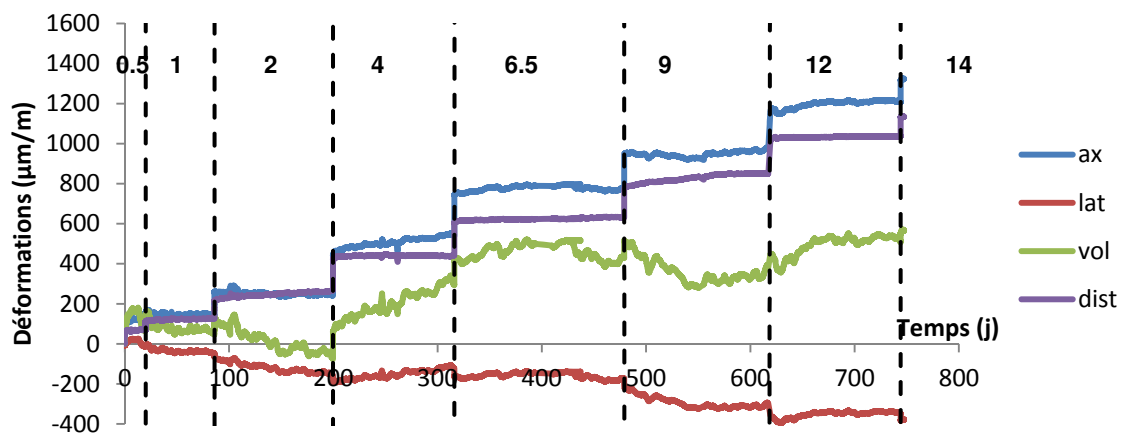
C1. Résultats des essais de fluage – Série en condition sèche	3
C2. Courbes de fluages – Série à hygrométrie contrôlée	8

C1.Résultats des essais de fluage – Série en condition sèche

Modules mesurés à partir des courbes contrainte-déformation, données matériau et courbes des déformations totales axiales, latérales et volumiques ainsi que la disorsion en fonction du temps avec les chemins de sollicitation par échantillon.

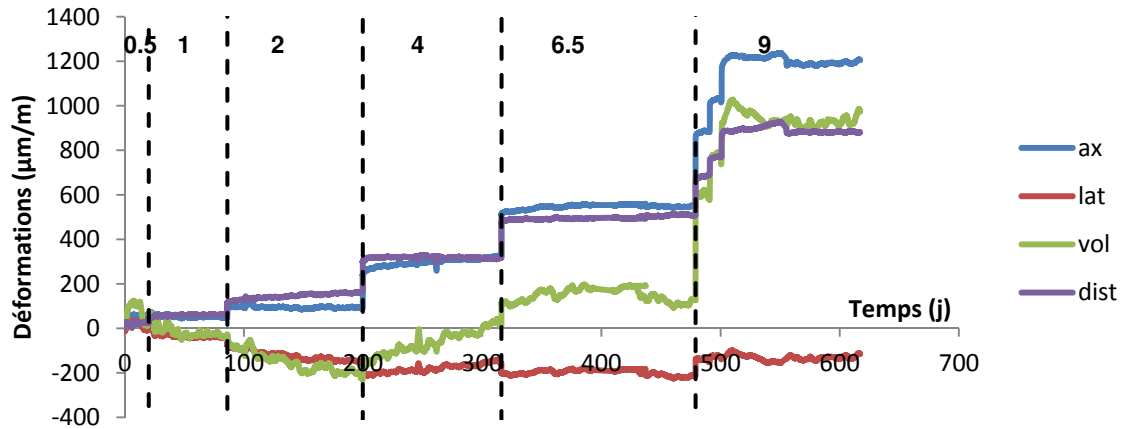
Craie de Saint-Martin-le-Noeud

SMb1			
ρ (g.cm ⁻³)	1.78		
Palier (MPa)	E_{ax} (GPa)	E_{lat} (GPa)	ν
0.5	8.6	-68.7	0.13
1	7.3	-49.4	0.15
2	8.5	-65.6	0.13
4	9.8	-57.9	0.17
6.5	12.1	-60.3	0.20
9	14.1	-56.9	0.25
12	16.8	-50.8	0.33
14	18.7	-57.1	0.33
Moyenne	12.66	-59.61	0.22
Ecart-type	4.04	5.96	0.09



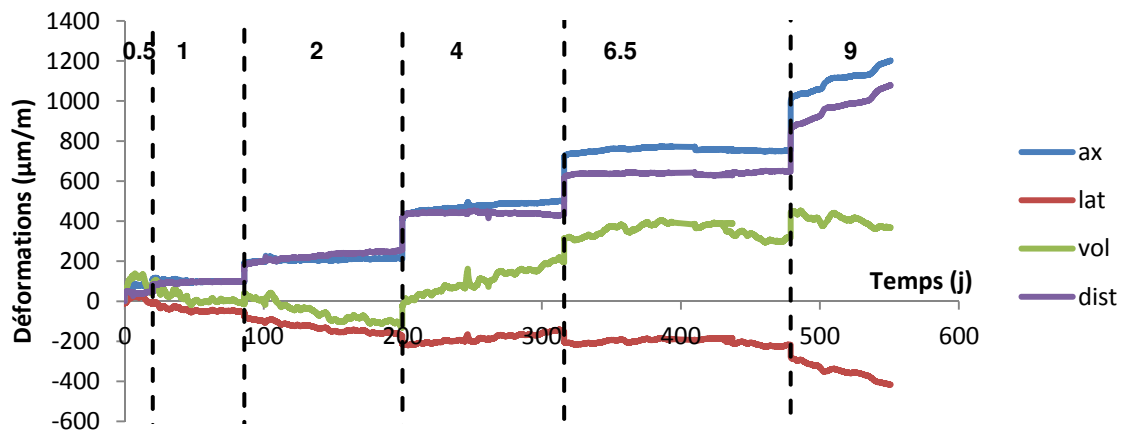
SMb3

ρ (g.cm ⁻³)			
		1.69	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	18	-54.4	0.33
1	18.2	-49.9	0.36
2	16.1	-53.2	0.30
4	13.7	-40	0.34
6.5	12.8	-56	0.23
Moyenne	15.76	-50.7	0.31
Ecart-type	2.45	6.39	0.05



SMb5

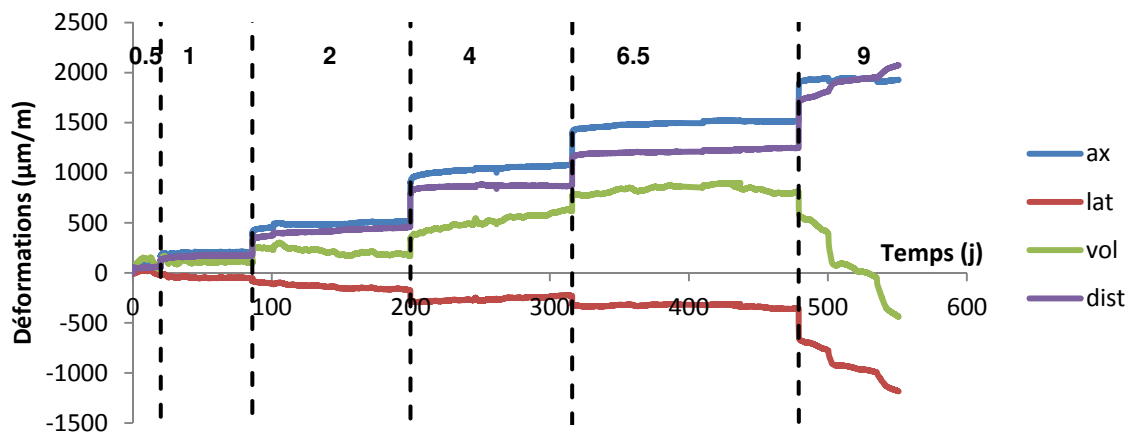
ρ (g.cm ⁻³)			
		1.79	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	11.4	-50.7	0.22
1	11.2	-45.1	0.25
2	11	-50.8	0.22
4	10.3	-45.8	0.22
6.5	11.1	-47.6	0.23
9	10.1	-41.9	0.24
Moyenne	10.85	-46.98	0.23
Ecart-type	0.52	3.45	0.01



Craie d'Estreux

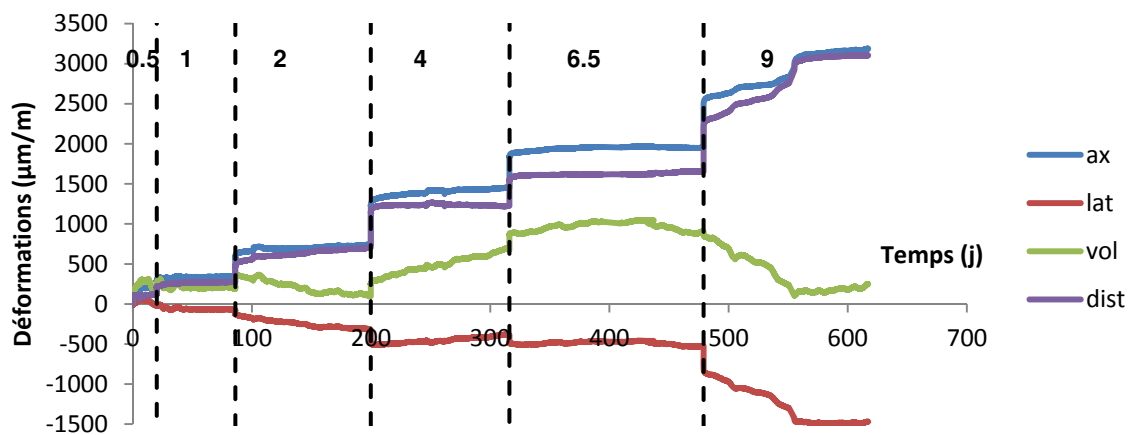
EXb2

ρ (g.cm ⁻³)		1.81	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	11.4	-54.9	0.21
1	10.5	-36.2	0.29
2	6.8	-40.1	0.17
4	5.7	-20.8	0.27
6.5	7.5	-28.4	0.26
9	6.8	-8.8	0.77
Moyenne	8.12	-31.53	0.33
Ecart-type	2.29	16.02	0.22



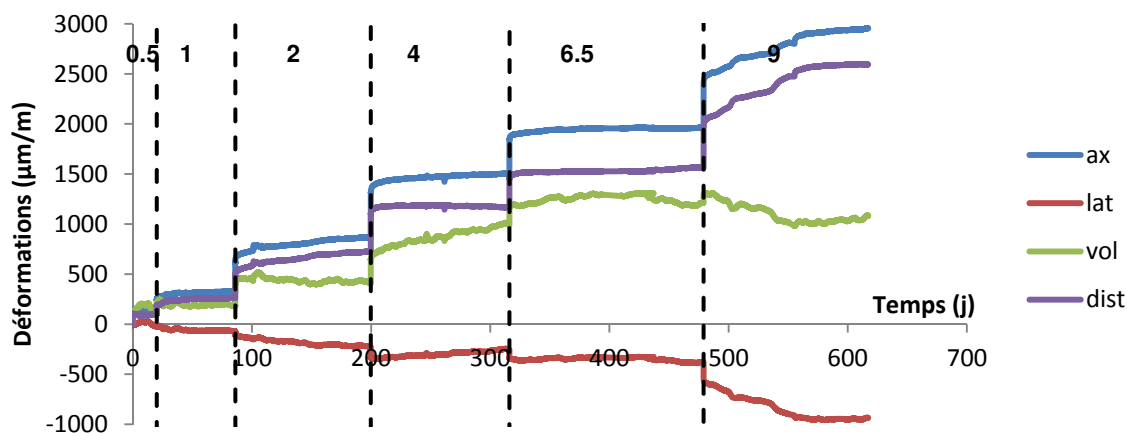
EXb4

ρ (g.cm ⁻³)		1.78	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	3.6	-79.2	0.05
1	6.9	-33.6	0.21
2	5	-23.6	0.21
4	4.3	-12.8	0.34
6.5	6.1	-24	0.25
9	4.6	-8.4	0.55
Moyenne	5.08	-30.27	0.27
Ecart-type	1.22	25.58	0.17



EXb6

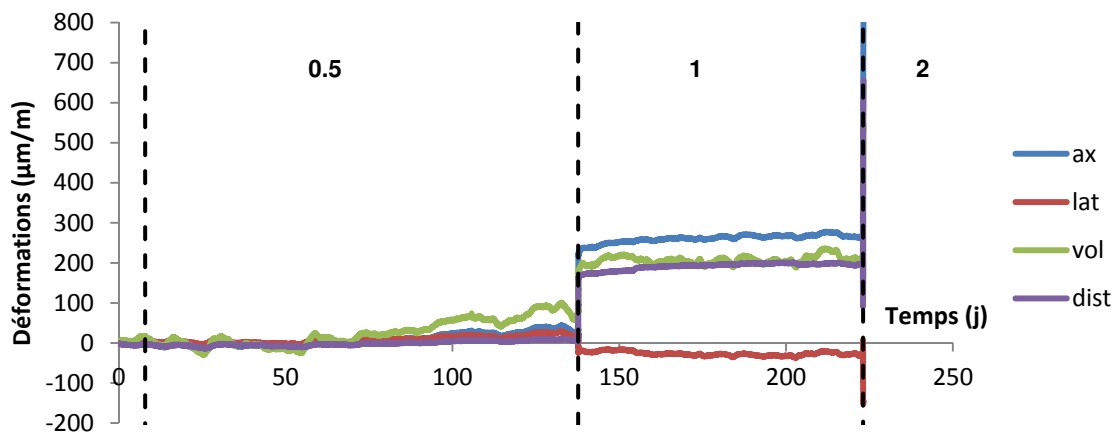
ρ (g.cm ⁻³) 1.77			
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	4.4	-42	0.10
1	7.7	-36.9	0.21
2	4	-31.4	0.13
4	4.8	-20.6	0.23
6.5	7	-28.9	0.24
9	5.8	-14.5	0.40
Moyenne	5.62	-29.05	0.22
Ecart-type	1.49	10.18	0.10



Craie de Château-Landon

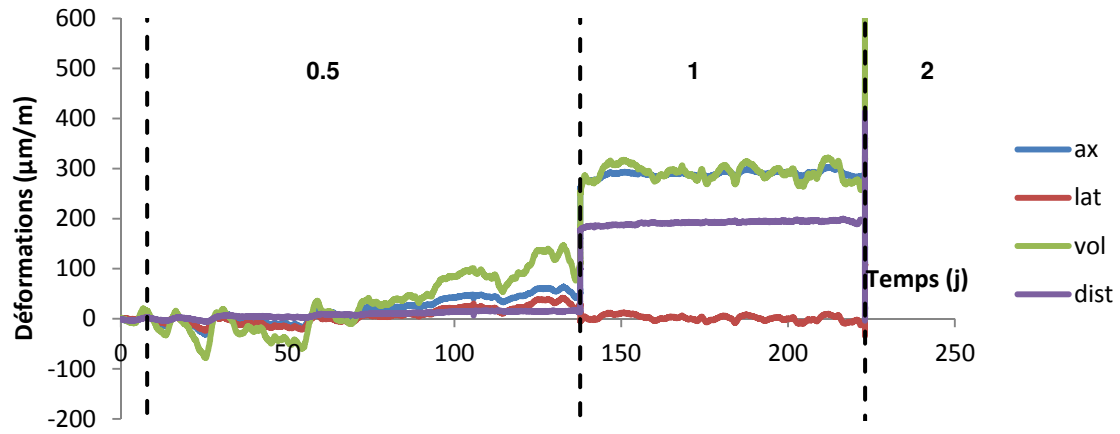
CH2-F

ρ (g.cm ⁻³) 1.52			
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
1	4.09	-18.57	0.22
2	5.56	-27.9	0.20
Moyenne	4.83	-23.24	0.21
Ecart-type	1.04	6.60	0.01



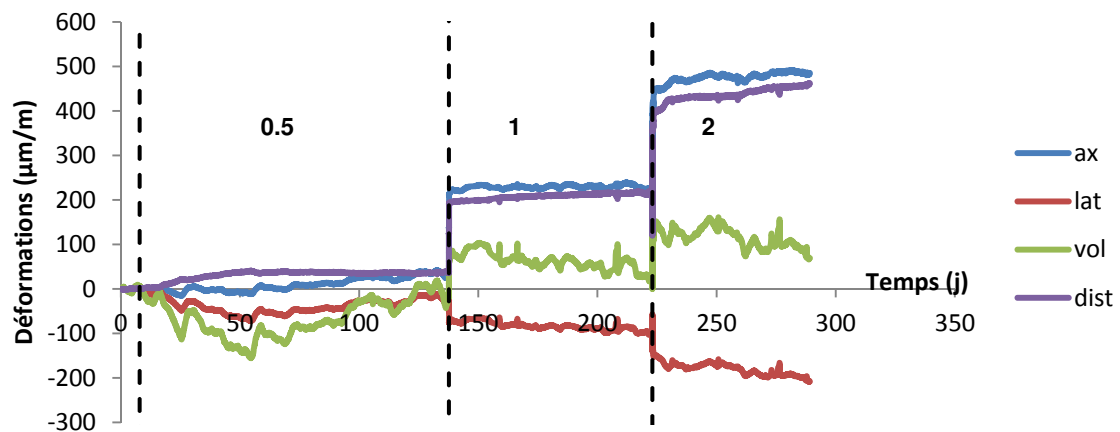
CH4-F

ρ (g.cm ⁻³)		1.54	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
1	3.6	-22.4	0.16



CH6-F

ρ (g.cm ⁻³)		1.69	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
1	5	-19.9	0.25
2	6.6	-22.3	0.30
Moyenne	5.80	-21.10	0.27
Ecart-type	1.13	1.70	0.03

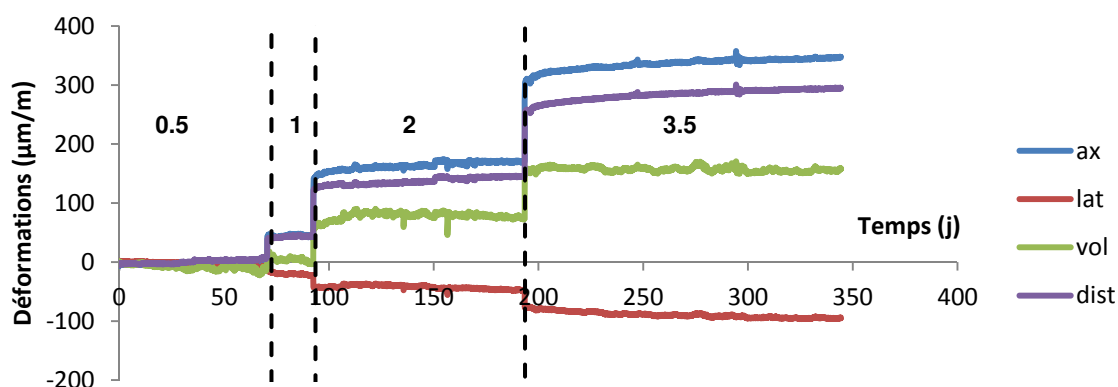
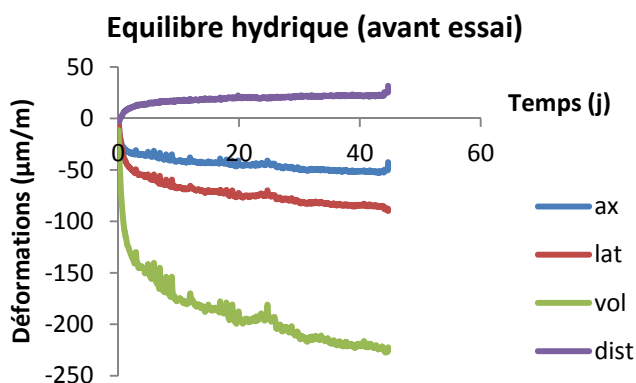


C2.Courbes de fluages – Série à hygrométrie contrôlée

Modules mesurés à partir des courbes contrainte-déformation, données matériau et courbes des déformations totales axiales, latérales et volumiques ainsi que la disorsion en fonction du temps avec les chemins de sollicitation par échantillon.

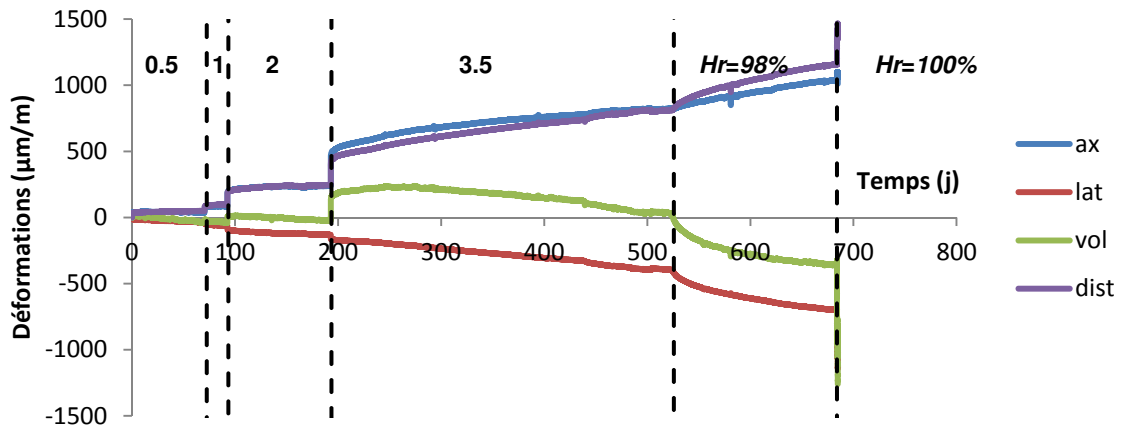
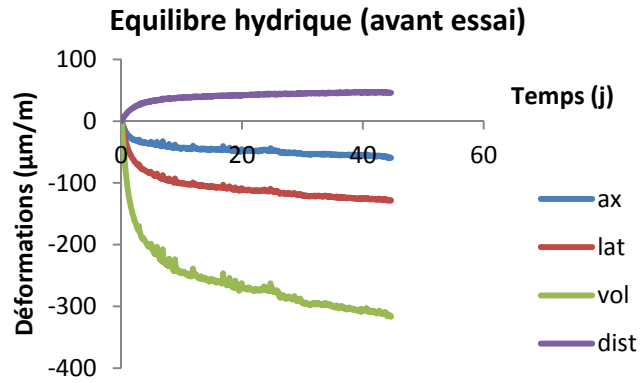
Craie de Saint-Martin-le-Noeud

SM85%			
ρ (g.cm ⁻³)	1.66		
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	74.9	-118.5	0.63
1	12.1	-57.8	0.21
2	2.4	-6	0.40
3.5	11.3	-56	0.20
Moyenne	11.70	-56.90	0.21
Ecart-type	0.57	1.27	0.01



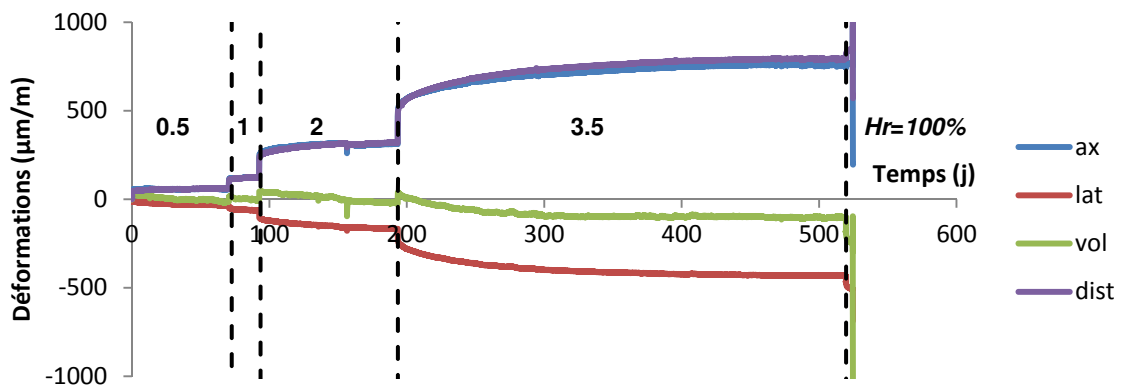
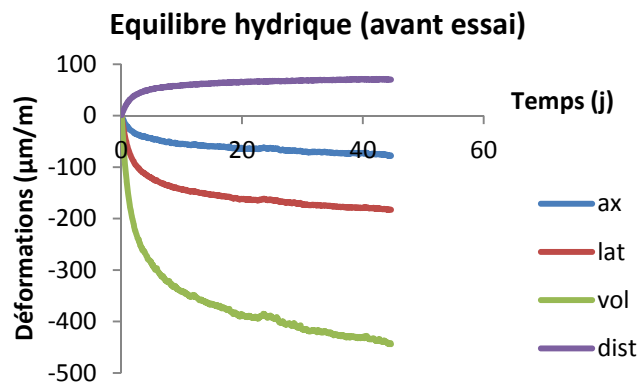
SM90%

ρ (g.cm ⁻³)			
1.68			
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	12.7	-41.3	0.31
1	12.1	-41	0.30
2	11.4	-42.6	0.27
3.5	8.2	-45.8	0.18
Hr=98%	-	-	-
Hr=100%	-	-	-
Moyenne	11.10	-42.68	0.26
Ecart-type	2.00	2.20	0.06



SM98%

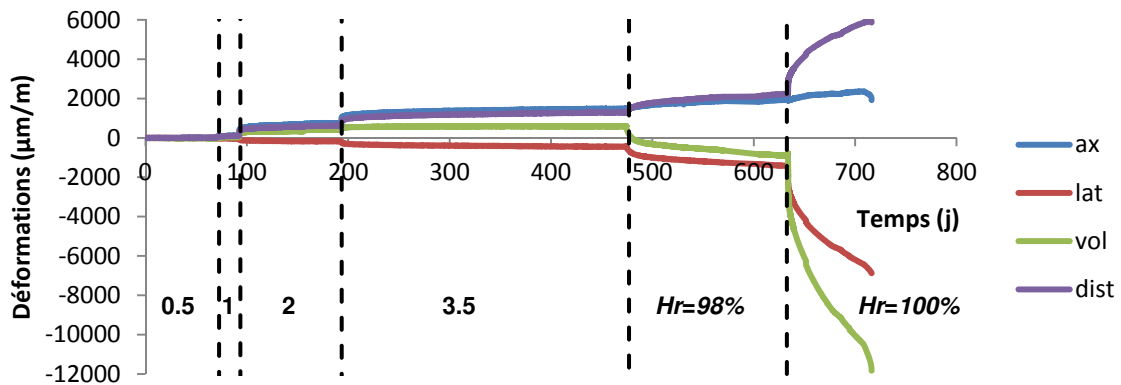
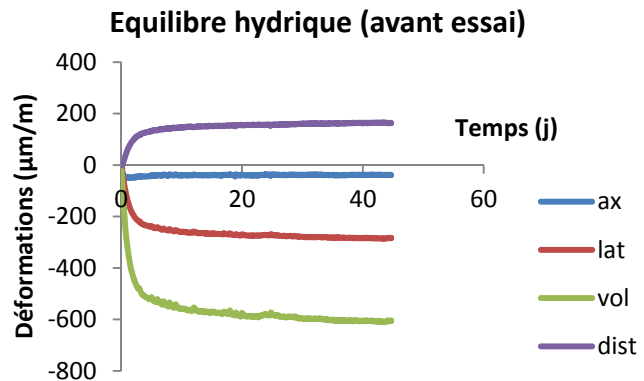
ρ (g.cm ⁻³)			
1.61			
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	8.8	-38.7	0.23
1	9.2	-35.1	0.26
2	9.1	-33	0.28
3.5	7.8	-26.9	0.29
Hr=100%	-	-	-
Moyenne	8.73	-33.43	0.26
Ecart-type	0.64	4.95	0.03



Craie d'Estreux

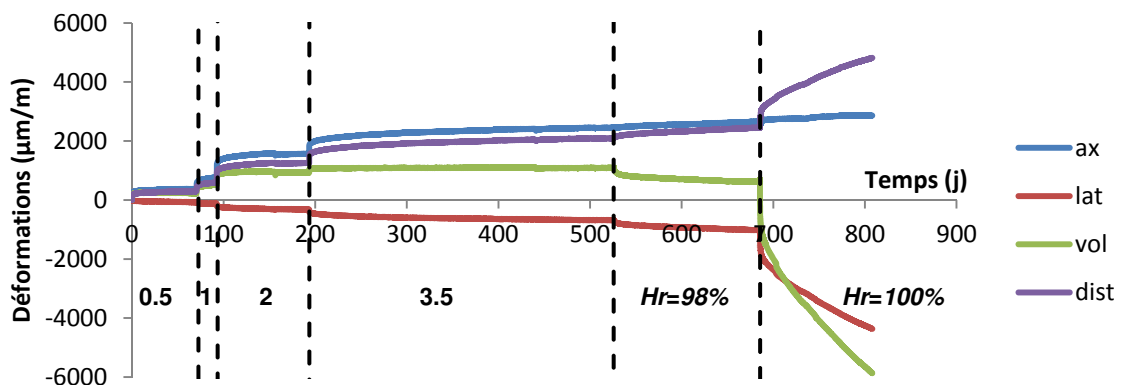
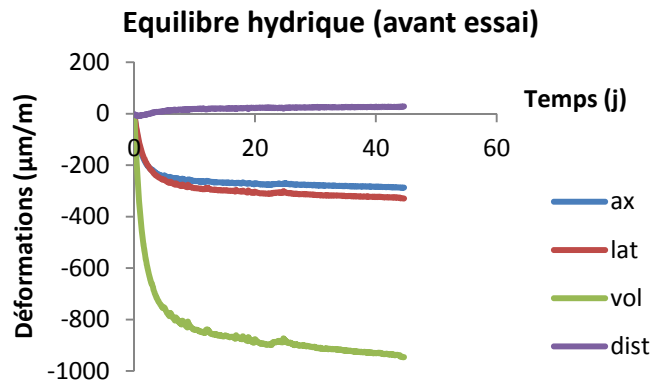
EX85%

ρ (g.cm ⁻³)		1.82	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	63.6	-47.5	1.34
1	5.3	-31.1	0.17
2	0.2	0.7	-0.29
3.5	5.2	-23.5	0.22
Hr=98%	-	-	-
Hr=100%	-	-	-
Moyenne	5.25	-27.30	0.20
Ecart-type	0.07	5.37	0.04



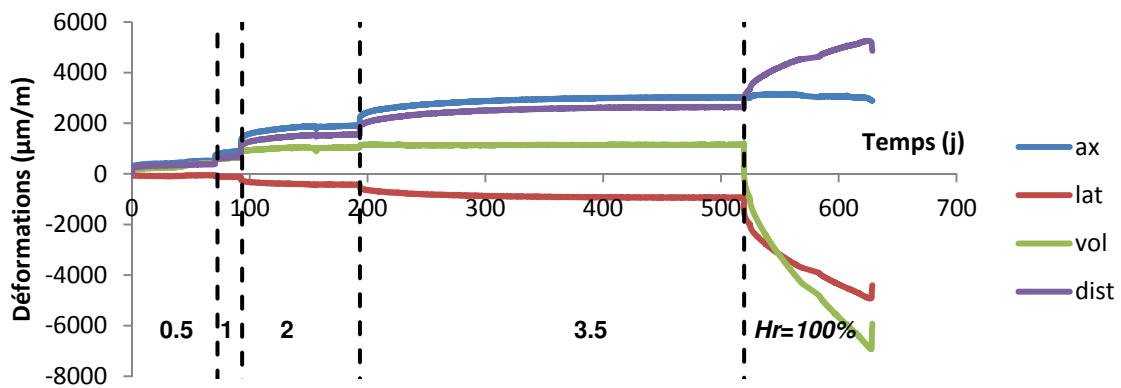
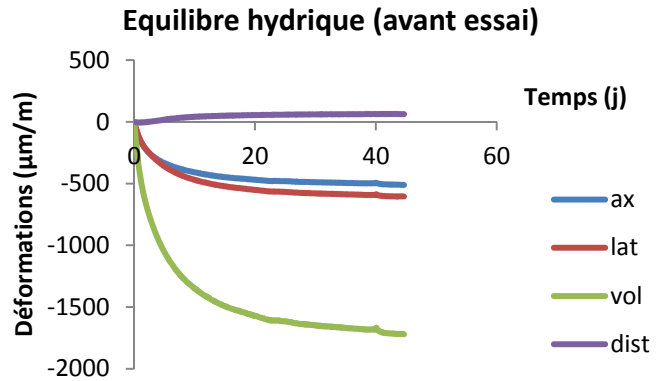
EX90%

ρ (g.cm ⁻³)		1.81	
Palier (MPa)	E _{ax} (GPa)	E _{lat} (GPa)	ν
0.5	2.2	-22.6	0.10
1	2.8	-24.1	0.12
2	3.2	-17.1	0.18
3.5	4.8	-22	0.22
Hr=98%	-	-	-
Hr=100%	-	-	-
Moyenne	3.25	-21.70	0.15
Ecart-type	1.11	2.56	0.06



EX98%

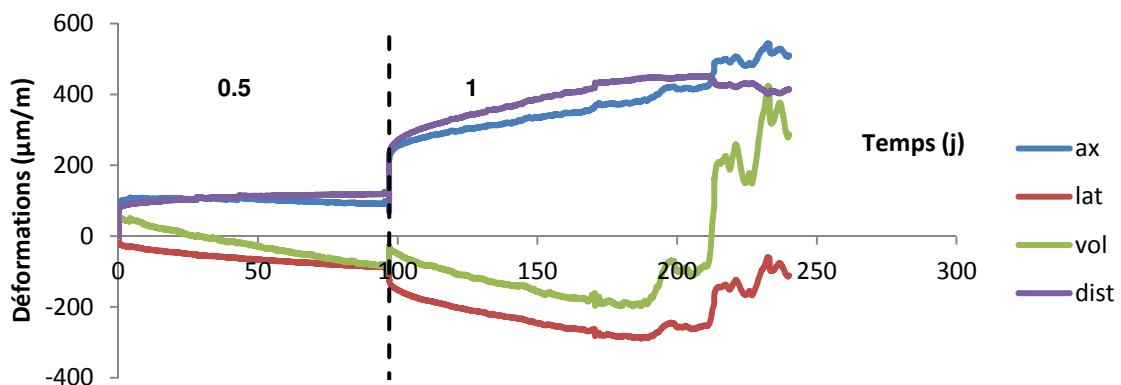
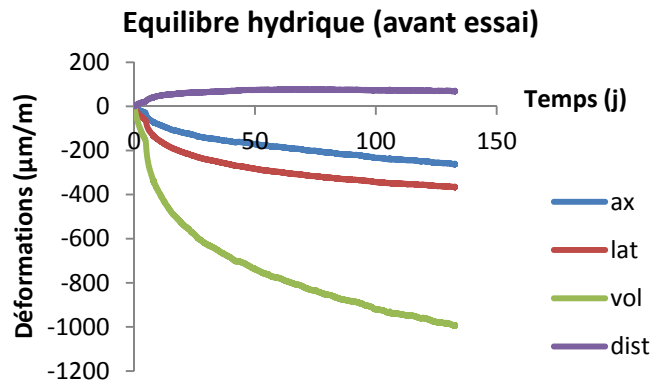
ρ (g.cm ⁻³) 1.79			
Palier (MPa)	E_{ax} (GPa)	E_{lat} (GPa)	ν
0.5	1.8	-9.6	0.19
1	3	-14.6	0.21
2	3.5	-14.6	0.24
3.5	4	-13.5	0.30
<i>Hr=100%</i>	-	-	-
Moyenne	3.08	-13.08	0.23
Ecart-type	0.94	2.37	0.05



Craie de Château-Landon

CH1-F

ρ (g.cm ⁻³) 1.50			
Palier (MPa)	E_{ax} (GPa)	E_{lat} (GPa)	ν
0.5	4.2	-20.7	0.20
1	4.7	-17.8	0.26
Moyenne	4.45	-19.25	0.23
Ecart-type	0.35	2.05	0.04



Annexe D :

Vers la modélisation du comportement mécanique des craies étudiées

D1. Brève revue de l'état de l'art sur le comportement des géomatériaux poreux.....	3
D2. Proposition de modèle de comportement mécanique pour les craies étudiés	14

Cette annexe décrit très succinctement l'aspect modélisation du comportement mécanique des craies étudiées au regard des résultats expérimentaux obtenus décrits dans le corps du manuscrit et la littérature abondante sur les géomatériaux poreux. Il se veut simple et opérationnel pour une utilisation dans les diagnostics de stabilité à court et long terme d'ouvrages creusés dans ce type de matériau.

Nous avons contribué à la partie bibliographique. La partie concernant les développements et la validation du modèle a été réalisée entièrement par Mountaka Souley de l'INERIS.

D1. Brève revue de l'état de l'art sur le comportement des géomatériaux poreux

D1.1. Généralités

Le comportement mécanique des géomatériaux très poreux est très varié et dépend en bonne partie de la contrainte moyenne et du chemin et l'historique du chargement. Typiquement, à très faible niveau de contrainte, les roches poreuses rompent par développement d'un ou plusieurs plans (ou bandes) de cisaillement accompagnés d'un comportement radoucissant : les déformations à l'échelle microscopiques résultent essentiellement de la dilatance des microfissures et la rotation des grains. A des contraintes moyennes élevées, les géomatériaux poreux subissent un comportement ductile qui est microscopiquement associé aux déformations volumiques de compaction. La compaction inélastique de l'espace poreux se produit sur les débris et/ou en glissement à travers les contacts entre les grains, alors que la rupture fragile domine les processus microscopiques. En fonction du chemin de chargement, le matériau peut éventuellement rompre avec une localisation des déformations de cisaillement.

Une des extensions pionnières de la théorie de la plasticité des métaux au comportement plastique des sols a été réalisée par Dc Drucker et Prager 1952 quand ils ont étendu le critère de rupture de von Mises pour tenir compte de confinement dans les milieux granulaires.

En 1957, D.C. Drucker et al. 1957 ont en outre proposé que le comportement volumique plastique des sols peut être modélisé par un écrouissage (durcissement) de déformations de compression par une enveloppe de rupture ouverte de type Drucker-Prager. Même si des précédents modèles pour les sols et critères de rupture tels que celui de Mohr-Coulomb permettent d'approcher la résistance au cisaillement avec le confinement, cet écrouissage était l'un des premiers qui ait tenté de coupler les comportements déviatorique et volumique des milieux granulaires. Depuis lors, une variété de modèles plastiques avec écrouissages ont été développés.

En effet, la théorie de la plasticité procure un cadre constitutif pour l'analyse du comportement inélastique et la compaction dans les milieux granulaires tels que les sols (Davis et Selvadurai 2005, Desai et Siriwardane 1984), grès poreux (Baud et al. 2006, Grueschow et Rudnicki 2005, T.F. Wong et Baud 1999), diatomites (Fossum et Fredrich 2000) et les roches carbonatées (Vajdova et al. 2004). En particulier, deux classes de modèles de plasticité sont souvent invoquées : le modèle d'état critique (Schofield et Wroth 1968) qui a eu un impact profond en mécanique des sols et le modèle « cap » formulé par Di Maggio et Sandler 1971 avec les sols et les roches poreuses à l'esprit. Le rôle du « cap » était d'améliorer la réponse des géomatériaux de telle manière qu'on puisse inclure une représentation du phénomène de compaction du sol (diminution irréversible de volume sous pression).

Alors que de nombreuses versions du modèle d'état critique ont été proposées pour les sols (Wood 1990) dont le très connu modèle de Cam-Clay modifié, ou pour les roches réservoirs poreuses (Carroll 1991). Les modèles d'état limite de Carroll et « cap » de Di Maggio et Sandler 1971 ont quatre caractéristiques communes : (a) tous deux supposent le comportement plastique en compaction comme isotrope ; (b) la fonction de charge est supposée être indépendante du troisième invariant des contraintes ; (c) l'écroûissage positif de déformation se caractérise par une fonction de charge qui dépend uniquement de la déformation volumique plastique ; (d) les deux modèles supposent l'écoulement plastique associé satisfaisant à la condition de normalité.

L'un des premiers critères à surfaces de charges fermées accompagné de son implantation numérique sans lissage¹ des arêtes a été présenté par Di Maggio et Sandler 1971 et représenté sur la Figure D.1. Par la suite, des algorithmes spécifiques d'implantation des modèles dans les codes aux éléments finis et de lissage ont été proposés (Dolarevic et Ibrahimbegovic 2007, Swan et Seo 2000, Bathe et al. 1980, Sandler et Rubin 1979, etc..) dont la Figure D.2 illustre un exemple. Même si de tels modèles à surface fermée ont été initialement développés pour les sables, ils ont été utilisés avec succès pour d'autres matériaux tels les céramiques ou poudres métalliques ou pharmaceutiques, les argiles et le béton (Chen et Mizuno 1990, Desai et Siriwardane 1984).

Plus précisément, pour la modélisation des géomatériaux poreux, des avancées significatives ont été faites durant ces dernières décennies. Plusieurs modèles plastiques ont été proposés pour tenir compte des influences de la porosité, d'expansion et d'effondrement des pores (Seifert et Schmidt 2009, Aubertin et Li 2004, Zohdi et al. 2002, Shao et Henry 1991). D'autres études se sont intéressées à la propagation des microfissures, à la localisation des déformations et aux déformations visqueuses dans les matériaux poreux (Mroginski et al. 2011, Lecarme et al. 2011, Hsu et al. 2009, Radi et al. 2002). Basé sur le travail de référence de Gurson 1977, un certain nombre de progrès ont été réalisés sur l'analyse micromécanique afin de déterminer la fonction de charge plastique macroscopique et le potentiel par procédure d'homogénéisation (Quang et He 2008, Monchiet et al. 2008). Tous ces modèles ont clairement montré que le comportement macroscopique de matériaux poreux dépend de la porosité et de son évolution.

Certains des modèles élastoplastiques proposés pour les géomatériaux poreux avec l'examen du mécanisme de l'effondrement de pores négligent l'effet de saturation (Xie et Shao 2012, Xie et Shao 2006, Homand et Shao 2000c) d'autres le prennent en compte (Yang et al. 2015).

¹ Plus d'attention a été faite dans la littérature sur le traitement numérique de la transition entre les surfaces de charge en cisaillement et en compression notamment puisque la normale n'est pas bien définie (Simo et al. 1988, Sandler et Rubin 1979 par exemple).

La plupart des modèles (à court terme) de comportement des géomatériaux poreux se basent sur une surface de charge « cap » écroissable de forme sphérique, elliptique² ou composite³ tenant compte des différents mécanismes : cisaillement, effondrement de pores et/ou traction. Dans le cas de la craie, on peut citer notamment les développements constitutifs (adaptations ou utilisations) et numériques faits dans le cadre du programme européen PASACHALK « Mechanical Behaviour of Partially and Multiphase Saturated CHALKs Fluid-skeleton » (CONTRACT N° : ENK6-2000-00089) et dont les principaux partenaires sont ELF Norge, TOTALFINAELF Exploration Norway, l'École Nationale des Ponts et Chaussées (CERMES) et le département GéoMaC de l'Université de Liège. Nous avons résumé dans Tableau D.1 les différents modèles (développés ou utilisés) en nous limitant seulement à la réponse instantanée.

Il est intéressant de souligner que Xie et Shao 2012 ont développé un modèle pour la craie de Lixhe qui peut être généralisable à d'autres géomatériaux fortement poreux. Il s'agit d'une version améliorée des travaux de l'équipe de Shao au laboratoire de mécanique de Lille et/ou en collaboration avec d'autres laboratoires (Xie et Shao 2006, Homand et Shao 2000a, Homand et Shao 2000b, Homand et Shao 2000c, Homand et al. 1998, Schroeder et Shao 1996, Shao et Henry 1991). Il a également écrit dans le cadre de la poroplasticité en conditions saturées ou non saturées.

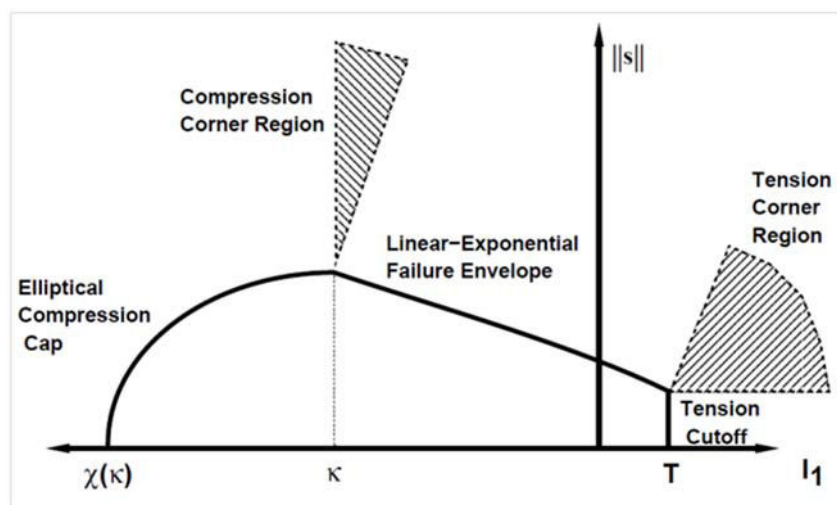


Figure D.1 : Critère fermé avec 3 surfaces de charge sans lissage dans l'espace des deux invariants de contraintes (norme du tenseur des contraintes déviatorique vs 1^{er} invariant) : contraintes de compressions négatives (Di Maggio et Sandler 1971)

² Ce sont généralement des extensions des modèles elliptiques de Cam-clay ou Carroll 1991 : c'est le cas des modèles de Teng-fong Wong et Baud 2012, Grueschow et Rudnicki 2005 et Baud et al. 2006.

³ La surface de charge en cisaillement (F_s) est généralement linéaire (Mohr-Coulomb, Drucker-Prager ou une droite horizontale dans le plan (p, q)) ou parabolique (T.F. Wong et al. 1997). La surface de charge volumique (F_c) est généralement elliptique Cam-clay ou Carroll 1991. La surface de charge en traction (F_t) est une droite verticale ou un cercle dans le plan (p, q) . Certains auteurs proposent également des morceaux de courbes pour les transitions (F_s)/(F_c) ou (F_c)/(F_t) comme par exemple dans le modèle de Dolarevic et Ibrahimbegovic 2007.

Tableau D.1 : Caractéristiques des modèles développés dans le cadre de PASACHALK restreintes à la réponse instantanée sans effet de la pression capillaire (tirées de PASACHALK 2004)

Group	Reference	Mechanisms taken into account
# 1	De Gennaro et al. 2003, Schroeder 2003, Collin et al. 2002, Datcheva 2001	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pore collapse: elliptical yield surface with associated plastic flow and isotropic hardening 2. Shear: straight-line yield surface with non-associated plastic flow and isotropic hardening 3. Tensile failure: vertical straight-line yield surface with associated plastic flow, no hardening
# 2	Homand et Shao 2000c; follows from Homand et al. 1998 and Schroeder et Shao 1996	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pore collapse: elliptical yield surface with non-associated plastic flow and isotropic hardening 2. Shear: straight-line yield surface with non-associated plastic flow and isotropic hardening
# 3	Gutierrez et al. 2000	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pore collapse: elliptical cap yield surface with associated plastic flow and isotropic hardening 2. Shear: straight-line yield surface with non-associated plastic flow, smooth transition to pore collapse surface, no hardening 3. Tensile failure: curved yield surface with associated plastic flow, no hardening
# 4	Papamichos et al. 1997	Modified surface includes effects of pore collapse and shearing: modified straight-line yield surface at low mean stress transitions to cap-like yield surface at high mean stress, with non-associated plastic flow and isotropic hardening; both friction angle and preconsolidation stress are hardening parameter
# 5	Plischke 1996	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pore collapse: elliptical yield surface with associated plastic flow and isotropic hardening 2. Shear: straight-line yield surface with non-associated plastic flow, no hardening
# 6	Foged et al. (1995)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pore collapse: elliptical yield surface with associated plastic flow and isotropic hardening 2. Shear: straight-line yield surface with non-associated plastic flow, no hardening <p>With transition surface joining them</p>
# 7	Abdulraheem et al. 1993	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pore collapse: elliptical yield surface with associated plastic flow and isotropic hardening 2. Shear: straight-line yield surface with non-associated plastic flow, no hardening
# 8	Shao et Henry 1991	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pore collapse: $p = \text{constant}$ straight-line yield surface with associated plastic flow and isotropic hardening 2. Shear: modified straight-line yield surface (Lade 1984) with non-associated plastic flow and isotropic hardening

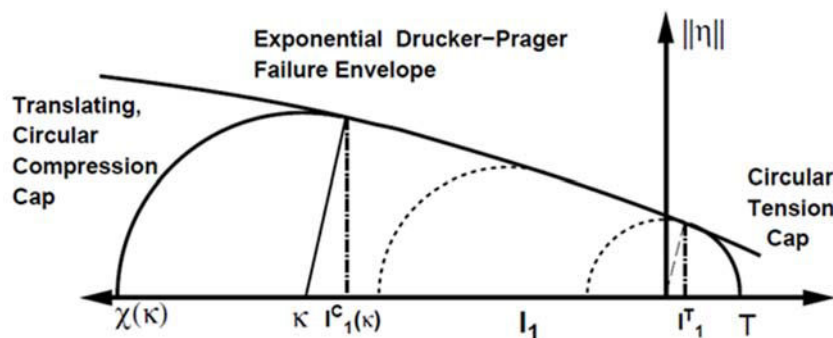


Figure D.2 : Critère fermé avec 3 surfaces de charge avec lissage dans l'espace des deux invariants de contraintes (norme du tenseur des contraintes déviatorique vs 1^{er} invariant) : contraintes de compressions négatives (Swan et Seo 2000)

D1.2. Mécanisme de cisaillement

Le modèle à frottement interne (PASACHALK), pour le mode de rupture en cisaillement, est construit à partir du cône de Drucker-Prager en introduisant – encore une fois – une dépendance de l'angle de Lode, afin de se rapprocher du critère de Mohr-Coulomb (il s'agit en fait d'un lissage de la surface de charge de ce critère). La formulation proposée par Van Eekelen est alors retenue et peut être décrite de manière semblable au critère de Drucker-Prager:

$$\begin{cases} f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} - m \left(I_1 + \frac{3c}{\tan \varphi} \right) = 0 \\ m = a(1 + b \sin 3\theta)^n \end{cases} \quad (1)$$

Soit dans le plan (p, q) :

$$\begin{cases} f_s(p, q) = q - 3\sqrt{3}m \left(p + \frac{c}{\tan \varphi} \right) = 0 \\ m = a(1 + b \sin 3\theta)^n \end{cases} \quad (2)$$

La surface de plasticité est décrite comme une surface plane avec écrouissage isotrope et une loi de plasticité associée. La contrainte de préconsolidation est reliée aux déformations plastiques volumiques de la même façon que dans le cas du pore-collapse.

D1.3. Mécanisme de traction

Il est généralement observé un comportement élasto-fragile sans résistance résiduelle des roches lorsqu'elles sont sollicitées en traction : ce qui se explique l'absence d'écrouissage en traction pour la plupart des modèles rencontrés dans la littérature. Ainsi pour des raisons pratiques, les implantations numériques se font avec un « cut-off » en traction (Figure D.1), même si des problèmes numériques peuvent subvenir au niveau des arêtes, d'où le lissage (Figure D.2).

Toutefois dans certains cas, l'écriture même de la surface de charge fait que la transition entre le cisaillement et la traction soit continûment différentiable (Figure D.2) ou que la rupture en traction se réduit à un point (critère de Hoek-Brown par exemple) ou que le mécanisme de traction fasse de la surface de charge de

cisaillement (Homand et Shao 2000c, Gutierrez et al. 2000, Papamichos et al. 1997, etc) ou même que le mécanisme de traction soit traité de manière indépendante (Schroeder 2003, Collin et al. 2002, Datcheva 2001, etc).

D1.4. Mécanisme de « pore collapse »

La Figure D.3 rappelle un exemple de résultats de compression hydrostatique conduit sur une craie. Elle montre clairement l'analogie de comportement avec le grès, le calcaire et le tuffeau en compression hydrostatique et trois domaines de comportement distincts. Dans la première zone associée aux faibles contraintes appliquées relativement une valeur limite (au-delà de laquelle un très large écoulement plastique se produit), la réponse généralement observée est linéaire. L'écoulement plastique (zone 2) est représenté par une compaction volumétrique. D'un point de vue physique, cette importante déformation plastique de compaction peut être reliée au phénomène irréversible d'effondrement de pores dû à la rupture de ponts (Schroeder 1995). Dans la zone 3, une augmentation d'écoulement est notée et la craie devient de plus en plus raide avec l'augmentation de la contrainte moyenne. C'est la conséquence de la réduction de l'espace poral et du réarrangement des grains. Comme discuté précédemment ce résultat est représentatif de plusieurs géomatériaux poreux et aussi en accord avec les études reportées dans la littérature sur la craie. Les cycles de charge/décharge montrés sur cette figure indiquent systématiquement que chaque décharge démarre avec un domaine élastique, avec un module élastique qui augmente avec le niveau de contrainte comme conséquence à la réduction du volume de pores.

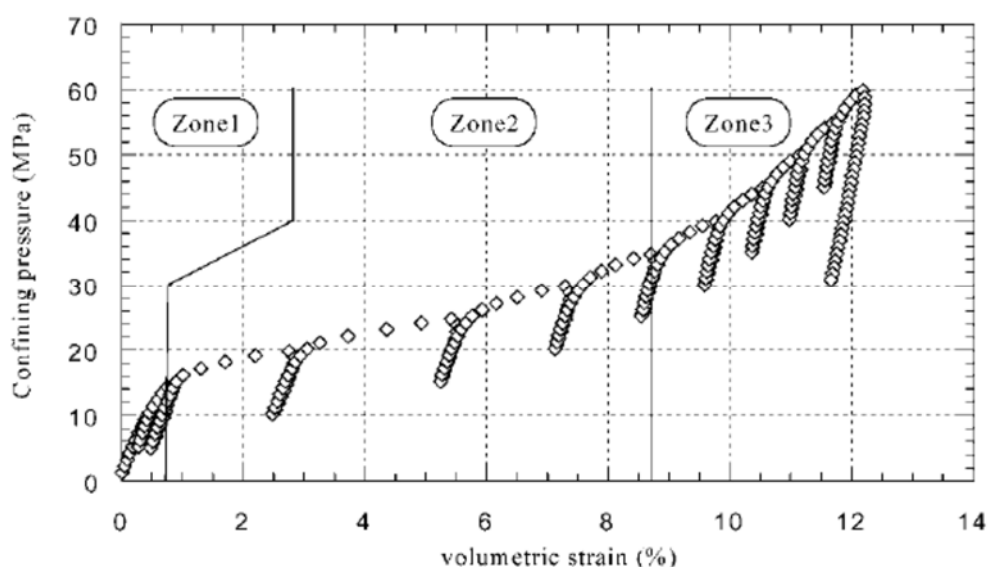


Figure D.3 : Courbe typique pression vs déformation volumétrique d'un essai de compression hydrostatique sur un échantillon de craie du Lixhe saturée en huile (Homand et Shao 2000a)

La plupart des modèles développés pour la modélisation du mécanisme d'effondrement de pores (surface de charge fermées) pour les craies en particulier, s'inspire de soit du modèle de Cam-clay modifié soit sur la base critère de Gurson

1977 un des premiers modèles d'endommagement ductile développé en métallurgie pour le comportement des alliages métalliques contenant des vides et largement utilisé dans la littérature pour les géomatériaux.

Par exemple, dans le cadre du projet PASACHALK plusieurs modèles (De Gennaro et al. 2003, Collin et al. 2002 et Datcheva 2001) étendent le modèle de Cam-clay. La surface de charge est donc elliptique avec un écrouissage isotrope et une loi d'écoulement associée.

Le modèle de base de Cam-Clay modifié a été étendu en introduisant une dépendance du troisième invariant des contraintes J_3 à travers l'angle de Lode θ , par l'intermédiaire du paramètre m :

$$\begin{cases} f(I_1, J_2) = J_2 + m^2 \left(I_1 + \frac{3c}{\tan \varphi} \right) (I_1 - 3p_c) = 0 \\ m = a(1 + b \sin 3\theta)^n \\ \theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\sqrt{J_2^3}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

Avec I_1 le premier invariant du tenseur des contraintes, $J_2 = -\frac{1}{2} s_{ij} s_{ji}$ et $J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{jk} s_{ki}$ deuxième et troisième invariants du déviateur des contraintes, p_c la pression de préconsolidation, c la résistance en compression (ou cohésion). Les paramètres a , b et n doivent vérifier certaines conditions (Van Eekelen 1980). Si l'on fait une transposition dans le plan (p, q) , avec $p = \frac{1}{3} I_1$ et $q = \sqrt{3} J_2$ on aura :

$$\begin{cases} f_c(p, q) = q^2 + 27m^2 \left(p + \frac{c}{\tan \varphi} \right) (p - p_c) = 0 \\ m = a(1 + b \sin 3\theta)^n \end{cases} \quad (4)$$

En supposant un écoulement plastique associé, la contrainte de préconsolidation est reliée aux déformations plastiques volumiques ε_v^p par la relation :

$$dp_c = \frac{1+e}{\lambda-\kappa} p_c d\varepsilon_v^p \quad (5)$$

Avec e l'indice des vides, κ et λ les pentes élastique et plastique dans le plan oedométrique (coefficients de gonflement élastique et de compressibilité plastique respectivement).

Pour les modèles basés sur le critère de Gurson, la fonction de charge s'appuie sur le critère de Tvergaard (1981, 1990) dans lequel le paramètre q_1 est pris égal à 1. L'avantage de ce critère basé sur la micromécanique est que la fonction de charge dépend explicitement de la porosité du milieu poreux, ϕ . La fonction de charge s'écrit comme suit :

$$F_c(\underline{\sigma}) = F_c(\sigma_{ij}) = \frac{q^2}{\sigma_M^2} + 2\phi \cosh \left(q_2 \frac{3p}{2\sigma_M} \right) - 1 - \phi^2 = 0 \quad (6)$$

σ_M représente le seuil plastique actuel de la matrice solide. Dans le cas des critères initiaux de Gurston et Tvergaard, la matrice solide vérifie le critère de plasticité parfaite de von-Mises, c'est-à-dire σ_M constante. Or dans beaucoup de cas, cette hypothèse de plasticité parfaite n'est pas vérifiée à cause d'écroûissage positif et/ou négatif. Dans le cas de la craie poreuse, la compaction volumique augmente les surfaces de contact en grains et donc les forces de liaison, entraînant une évolution du seuil plastique avec ces forces de contact.

D1.5. Mécanisme de succion

Nous avons vu que la présence d'eau modifie fortement le comportement mécanique de la craie notamment sa résistance, plus l'hygrométrie est importante, plus la résistance est faible. Ces observations sont en accord avec les résultats de Matthews et Clayton 1993, et avec celles observées sur les craies pétrolifères (Priol 2005, De Gennaro et al. 2003, Schroeder 2002). En particulier, l'augmentation de la succion accroît le domaine élastique, un écroûissage positif hydrique dû à la succion.

D'autres résultats expérimentaux ont montré une forte corrélation entre la saturation en fluide et le comportement mécanique tel que le pore collapse, la plasticité et la rupture (Duperret et al. 2005, Talesnick et al. 2001, Papamichos et al. 1997, Brignoli et Sartori 1993).

Les résultats expérimentaux de Nguyen (Nguyen 2009, Nguyen et al. 2008) ont mis en évidence l'influence de la succion et du temps sur le comportement mécanique de la craie d'Estreux. Les auteurs ont proposé une extension homothétique de la surface de charge de la craie avec la succion et la vitesse de chargement ou déformation, tout en insistant sur la nécessité de prendre en compte les effets hydriques et les effets du temps dans la modélisation du comportement de la craie d'Estreux. D'une manière générale, le couplage entre les effets de l'hygrométrie et du taux de déformation doit être considéré dans la modélisation du comportement de craie. Cet aspect a été étudié récemment par Nguyen 2009, Priol et al. 2007, Priol 2005 ou De Gennaro et al. 2004.

Plusieurs modèles rhéologiques ont été développés pour les roches partiellement saturées au cours de ces deux dernières décennies (Taibi et al. 2009, Collin et al. 2002, Homand et Shao 2000b, Papamichos et al. 1997, Maury et al. 1996, Piau et Maury 1995, Brignoli et al. 1994). Cependant, quelques problèmes subsistent dans ces modèles. Les modèles proposés par Brignoli et al. 1994 et Papamichos et al. 1997 prennent le degré de saturation dans la résistance du matériau, mais ignore la succion dont les effets dans les modèles constitutifs sont essentiels (Schmitt et al. 1994, Van Eeckhout 1976) ; Dans le modèle de Maury et al. 1996, Piau et Maury 1995 ou Homand et Shao 2000b deux surfaces de charge ont été adoptées pour décrire le saut de comportement entre deux états de craie saturée de deux fluides différents et le changement brutal à la transition d'état entre les deux fluides ne peut être évitée dans ces modèles.

Certains modèles (Taibi et al. 2009, Collin et al. 2002) développés à partir des modèles de mécanique des sols non saturés, par exemple, le modèle de Barcelone - BBM (Barcelona Basic Model, Alonso et al. 1990) lui-même une extension du modèle de Cam-Clay modifié, ont capturé quelques caractéristiques fondamentales de sols non saturés par exemple, l'effondrement plastique de la microstructure sur des chemins de mouillage. En effet, Delage et al. 1986 ont montré une similitude entre le comportement des sols non saturés et celui des craies (Schroeder 2002) en appliquant la notion de succion au milieu granulaire qu'est la craie. Dans ce cadre, De Gennaro et Pereira 2008 ont étendu le modèle BBM dans un cadre élasto-visco-hydromécanique en proposant le modèle RASTRA (RAte of STRAin model) validé sur des chemins de chargement oedométrique notamment sur la craie d'Estreux (Nguyen 2009).

Toutes ces contributions ont porté sur la modélisation du squelette solide et la variation de la résistance en fonction de la saturation en fluide. Cependant, très peu de modèles non saturés de roches prennent théoriquement en compte l'écrouissage en succion et définissent de manière adéquate la notion de contrainte effective. En particulier, aucun modèle prenant en considération les deux hystérésis, mécanique et hydraulique de non moindre importance, n'est disponible pour la modélisation de roches partiellement saturées, à l'exception des récents travaux de Ma (2015).

D1.6. Mécanisme de fluage

La succion est donc vue en tant que principal responsable de la sensibilité de l'eau sur le comportement mécanique de la craie. En raison de la microstructure de la plupart des craies poreuses, la pression capillaire est généralement faible comparée aux efforts appliqués ; le concept de succion ne peut pas à lui seul expliquer entièrement la diminution drastique de la résistance mécanique de la craie saturée en eau, et en particulier, la déformation dépendante du temps liée au fluage. La saturation en eau peut non seulement induire un effet capillaire mais également contribuer à la modification de la microstructure de la craie.

Le comportement visqueux de la craie a été étudié principalement par une campagne d'essai à différentes vitesses de chargement. L'essai de fluage et de la vitesse de chargement variable ont montré un comportement visqueux de la craie d'Estreux. L'augmentation de la vitesse de chargement écrouit la craie et provoque une extension de la limite élastique (Nguyen 2009).

Des travaux de Nguyen 2009, Xie 2005, Priol 2005, De Gennaro et al. 2004, De Gennaro et al. 2003, Schroeder 2002, Dahou et al. 1995 sur différentes craies ont aussi montré une dépendance du comportement visqueux à la vitesse de chargement. A partir des résultats de l'essai oedométrique sur plusieurs vitesses de chargement, Priol 2005 a montré une bonne reproduction des effets de la vitesse sur la limite élastique de la craie de Lixhe par une relation unique entre la contrainte effective, la déformation et la vitesse de déformation.

Il a été également proposé quelques modèles viscoplastiques pour le fluage de la craie poreuse (De Gennaro et al. 2003, Collin et al. 2002) à travers des approches classiques type Lemaître 1992 (Lemaitre et al. 2009) ou Cristescu 1986. Les déformations viscoplastiques évoluent de manière exponentielle avec la surcontrainte. La surface de charge de ces modèles est placée légèrement plus en dessous que son équivalente (de même forme) à court terme. De ce fait, les déformations irréversibles peuvent ainsi apparaître tout en étant dans le domaine élastique du modèle à court terme, ce qui correspond à ce que l'on observe généralement dans les essais de fluage. Dans ces cas, les déformations viscoplastiques peuvent être exprimées de cette façon (approche de Perzyna):

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \phi(f) \rangle \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (7)$$

Avec f la surface de charge, ϕ l'amplitude des déformations viscoplastiques, γ un paramètre de flux et g le potentiel de fluage. Dans le cas des modèles basés sur les vitesses de déformation (Gutierrez et al. 2000), les déformations volumiques viscoplastiques sont inversement proportionnelles à la durée pendant laquelle le matériau est soumis à une sollicitation mécanique :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \dot{\epsilon}_v^{vp} \frac{\partial g / \partial \sigma_{ij}}{\partial g / \partial p} \quad (8)$$

Bien que ce genre de théorie fournisse une description mathématique rigoureuse des déformations de fluage, les mécanismes physiques du fluage du matériau ne sont pas clairement identifiés, d'autant plus que pour des roches telles que la craie, la viscosité intrinsèque des grains solides semble être un facteur secondaire. De plus, la déformation viscoplastique est décrite indépendamment de la déformation plastique. Deux formulations distinctes seront nécessaires respectivement pour le comportement à court terme (modèle élastoplastique) et pour le comportement à long terme (modèle viscoplastique).

En se basant sur des analyses de la microstructure, les déformations différées sont souvent interprétées à l'aide de processus de dissolution sous pression des interfaces entre grains et la diffusion des espèces chimiques dans les fluides interstitiels (Xie et Shao 2006). Les auteurs proposent un modèle de couplage chemo-mécanique pour décrire le fluage de la craie. La déformation différée résulte de la dégradation progressive des propriétés élastiques et plastiques avec le temps, accélérée par l'augmentation de la saturation en eau. Utilisant le concept de base de la mécanique d'endommagement continu, une variable interne scalaire est introduite pour quantifier l'évolution de la réaction de dissolution (Pietruszczak et al. 2004). Toutefois, le modèle n'a pas encore été étendu au comportement promécanique couplé en partiellement saturé.

D1.7. Synthèse

En conditions isotherme et iso-hygro-métrique, le comportement à court terme des matériaux très poreux, donc la craie, peut se résumer comme indiqué sur la Figure D.4. C'est –à-dire :

- une rupture en traction sans (ici) ou avec écoulement ;
- une limite élastique, une résistance maximale et une résistance résiduelle dont l'évolution ici est linéaire dans le plan (p, q) c'est-à-dire selon le critère de Drucker-Prager qui a l'avantage par rapport aux critères de Mohr-Coulomb ou Hoek-Brown de dépendre de la contrainte principale intermédiaire σ_2 ;
- un double écoulement en pre et post-pic avec éventuellement une transition fragile/ductile ;
- une surface de charge pour la rupture hydrostatique (elliptique, cosinus hyperbolique etc ..) qui peut produire d'une part l'effondrement de pore suivi éventuellement d'une densification (compaction de la matrice).

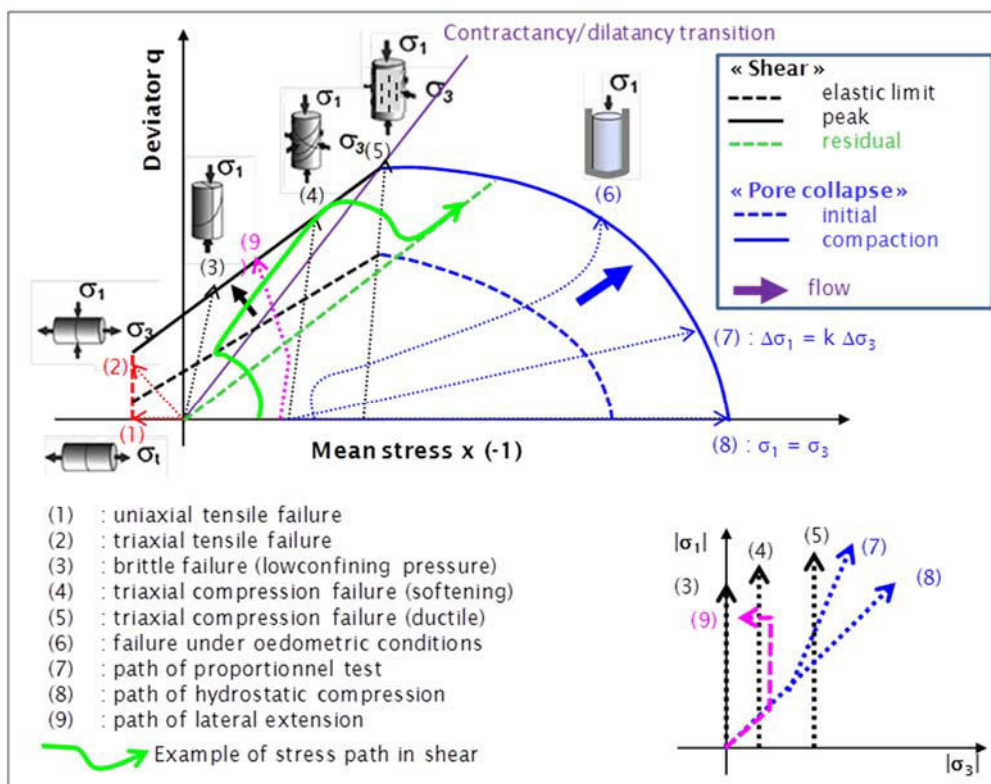


Figure D.4 : Représentation des surfaces de charge initiale pour les mécanismes de traction, cisaillement et pore-collaps avec en complément les chemins d'écrouissage et de chargement pour des essais conventionnels (Souley et al. 2016)

Ces mêmes surfaces de charge vont également écrouir lorsque l'hygro-métrie change (effets capillaires) (Nguyen et al. 2008, Nguyen 2010) ou avec la nature du fluide saturant (eau, huile ; Homand et Shao) et la composition chimique de fluide saturant.

D2. Proposition de modèle de comportement mécanique pour les craies étudiés

Les essais de laboratoire réalisés sur les trois craies et présentés dans les chapitres 3, 4 et 5 indiquent clairement un comportement de type élastoplastique avec double écrouissage (durcissement/radoucissement) avec des seuils de résistance dépendants de l'hygrométrie, l'effondrement des pores de la craie, les déformations différées, notamment volumiques à partir de seuils en contrainte et en hygrométrie.

Sur la base de ces essais et de la littérature, un modèle multi-mécanisme pour les matériaux très poreux a été développé au sein de l'INERIS par Souley et al. 2016. Ce modèle intègre les mécanismes de traction, de « pore collapse », de compaction et de fluage. En première approche, les auteurs se sont limités à des conditions isothermes et iso-hygrométriques. Ils négligent également les déformations volumiques différées (bien qu'avérées dans les essais de laboratoire) dans cette première approche. Le Tableau D.2 résume les principales équations constitutives du modèle relativement à la réponse à court terme.

Tableau D.2 : Résumé des équations constitutives du modèle pour les mécanismes court terme de cisaillement et de pore-collapse (Souley et al. 2016)

Mécanisme		Expression	Paramètre matériau
Traction		Surface plane verticale avec loi d'écoulement associée	σ_t
Cisaillement	Fonction de charge	$F_s(\underline{\sigma}) = F_s(\sigma_{ij}) = q + \alpha(p - p_0) = 0$	p_0
	Comportement pré-pic: loi d'écoulement dépendant d'une variable interne (γ : distorsion plastique)	$\alpha = \alpha(\gamma) = \alpha_m - (\alpha_m - \alpha_0)e^{-b_1\gamma}$	α_0, α_m, b_1
	Potentiel plastique	$G_s(\underline{\sigma}) = G_s(\sigma_{ij}) = q + \beta p$	
	Contractance/dilatance	$\beta = \beta(\gamma) = \beta_m - (\beta_m - \beta_0)e^{-b_1\gamma}$	β_0, β_m
	Comportement post-pic	Symétrie et homothétie de la fonction α	f (rapport d'homothétie)
Pore-collapse	Fonction de charge	$F_c(\underline{\sigma}) = F_c(\sigma_{ij}) = \frac{q^2}{\sigma_M^2} + 2q_1\phi \cosh\left(q_2 \frac{3p}{2\sigma_M}\right) - (1 + (q_1\phi)^2)$	q_1, q_2, ϕ_0
	Potentiel plastique	Loi d'écoulement plastique	
	Règle d'écrouissage	$\sigma_M = \sigma_M(\xi) = \sigma_M^0(1 + a\xi)$	a

Les principales hypothèses sur lesquelles le modèle a été construit sont ci-après citées.

1°) Le modèle est écrit dans le cadre des transformations infinitésimales. On considère donc que le tenseur des déformations totales est la somme du tenseur des

déformations élastiques et des tenseurs de déformations plastiques de cisaillement et de « pore collapse », respectivement.

2°) Le milieu est considéré comme homogène et isotrope.

3°) Le milieu est à porosité connectée. De plus, on considère que la compressibilité plastique des grains solides est négligeable, la porosité s'exprime en fonction de la déformation plastique volumique macroscopique.

4°) Le mécanisme de cisaillement plastique est commun pour la plupart des matériaux à frottement interne. Les déformations plastiques sont induites par le glissement des réseaux « cristallins » et des surfaces de contact entre grains. Les fonctions de charge les plus simples sont souvent basées sur le critère de Mohr-Coulomb et de Drucker-Prager. Il existe en général une surface limite : la surface de rupture qui définit l'état des contraintes auquel la rupture macroscopique se produit. Cette rupture se traduit généralement par la formation des bandes de localisation de cisaillement. La fonction de charge initiale et courante sera simplement de type Drucker-Prager.

Il est généralement observé dans les géomatériaux que le mécanisme de cisaillement peut induire des déformations plastiques volumiques de contraction et/ou de dilatance. Nous l'admettrons pour notre matériau. Ce qui justifie le choix d'une loi non associée.

5°) Le mécanisme de « pore collapse » fait intervenir explicitement la porosité et peut être décrit par le critère de Tvergaard (1981, 1990).

6°) Le mécanisme de traction est limité par une résistance à la traction σ_t .

7°) Le comportement à long terme est modélisé par une loi de type Lemaitre (comme l'ont suggérés les essais) avec seuil en contrainte et en humidité relative :

$$\dot{\underline{\varepsilon}}^{vp} = A \left(\frac{q - q_0}{\sigma_0} \right)^n \varepsilon_{eq}^m \frac{\partial q}{\partial \underline{\sigma}} \quad (9)$$

Avec A la viscosité du matériau, m variable d'écrouissage, n variable adimensionnelle, ε_{eq} la distorsion viscoplastique, q_0 la contrainte déviatorique d'enclenchement du fluage.

Ce modèle a été implanté dans FLAC^{3D} et vérifié à l'aide d'essais de compression uniaxiale et triaxiale (à Hr=98 %), de compression isotrope et de fluage uniaxial avec une hygrométrie de départ de 90 % puis une augmentation de cette hygrométrie. La Figure D.5 montre la comparaison entre essais de laboratoires et simulations pour des essais de compression uniaxiale et triaxiale (1 et 3 MPa de confinement) à une hygrométrie de 98 %. Les déformations axiales, latérales et volumiques sont représentées respectivement en rouge, bleu et vert. La Figure D.6 montre la comparaison entre essai de laboratoire et simulation pour un essai de compression

isotrope et la Figure D.7 montre la comparaison entre les distorsions viscoplastiques obtenues à l'aide d'un essai de fluage et d'une simulation.

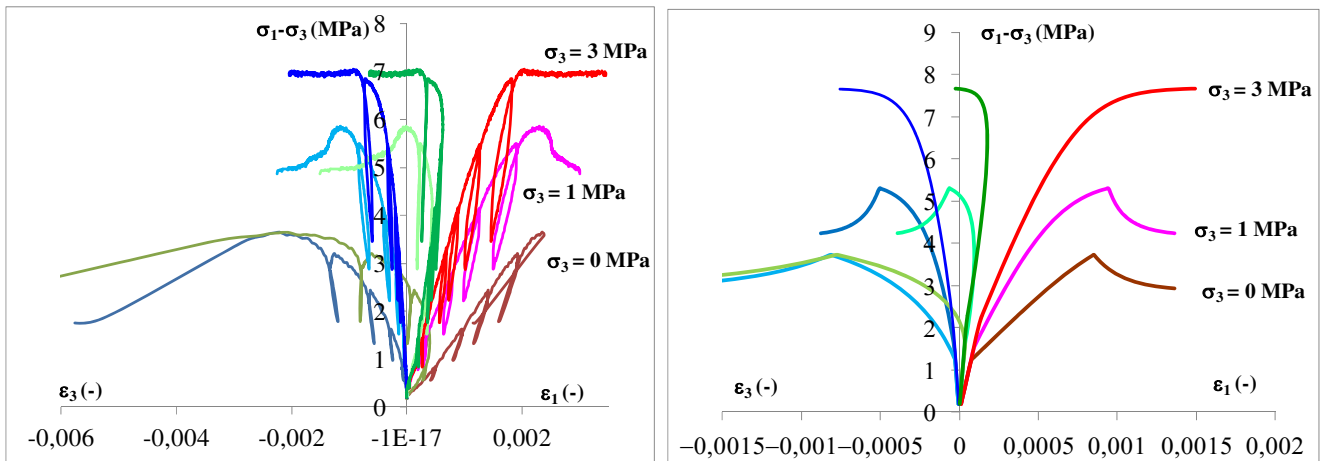


Figure D.5 : Comparaison des résultats expérimentaux (à gauche) et simulation (à droite) pour des essais de compression (uniaxiale et triaxiale) sur la craie d'Estreux (Souley et al. 2016)

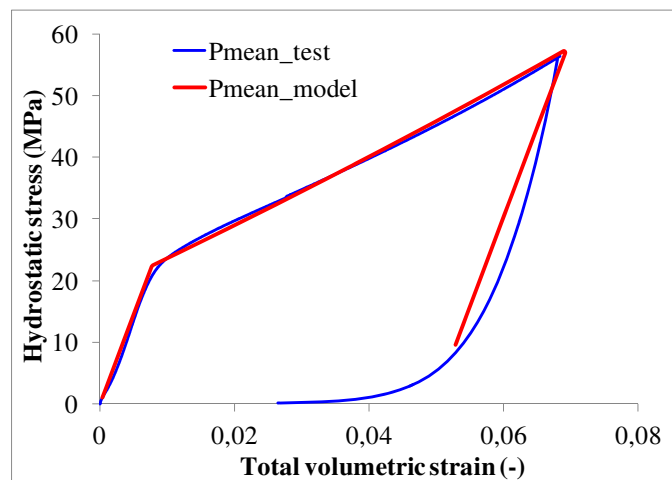


Figure D.6 : Comparaison des résultats expérimentaux et simulation pour un essai de compression isotrope sur la craie d'Estreux (Souley et al. 2016)

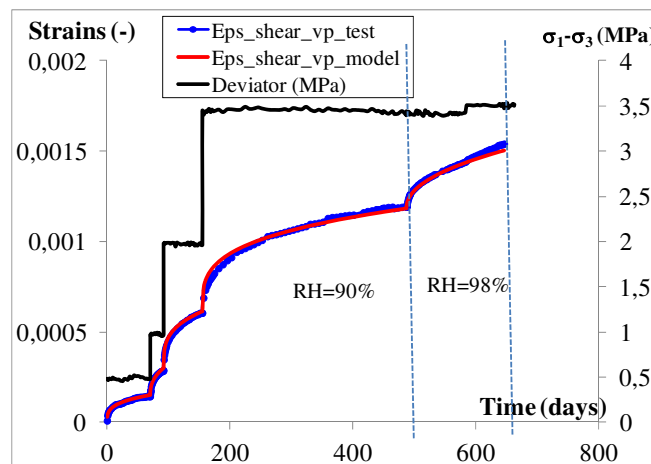


Figure D.7 : Comparaison des résultats expérimentaux et simulation pour un essai de fluage sur la craie d'Estreux (Souley et al. 2016)

Il en résulte que le modèle au travers de ces comparaisons, s'accordent bien avec les résultats expérimentaux. La prochaine étape reste d'intégrer la viscosité du matériau comme une fonction dépendant de l'humidité relative et de prendre en compte les déformations viscoplastiques volumiques. Le but ultime reste de pouvoir simuler le comportement du matériau à l'échelle du pilier de carrière sur une longue période de temps.

Résumé

Le risque d'instabilités d'ouvrages souterrains (naturels ou anthropiques) concerne plus de 10 000 communes en France. Les accidents ayant pour cause l'effondrement soudain de carrières souterraines sont parmi les plus destructeurs, aussi bien humainement que matériellement. L'évolution des possibles instabilités, dès lors que les enjeux sont importants, implique d'enrichir les connaissances actuelles afin de prévoir leur ampleur et leur impact en surface. Des travaux précédents ont démontré l'importance du couplage hydro-mécanique dans le diagnostic de stabilité. La complexité du phénomène d'interaction eau-craie est due à de nombreux facteurs environnementaux et la sensibilité à chacun de ces facteurs dépend entièrement de la craie considérée.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'influence de l'eau et de l'interaction eau-roche sur le comportement mécanique de trois craies dans le cadre d'une approche multi-échelles et multi-physiques.

L'étude des caractéristiques physiques et mécaniques de trois craies du Bassin Parisien, ainsi que leur rapport avec l'eau, a été réalisée. Les résultats obtenus à l'aide d'essais hydromécaniques à court terme restent cohérents avec la littérature.

Le « vieillissement » de la craie dans le cadre des carrières souterraines soumises à des fluctuations du niveau de la nappe a été prouvé et caractérisé. Il se traduit selon la craie, soit par un changement de la forme et la taille des cristaux dans la microstructure impliquant une amélioration des propriétés mécaniques en bord de pilier au détriment du cœur, soit par la présence de traces de dissolution dont la fréquence augmente dès que l'on s'éloigne du cœur, soit par une augmentation du nombre de microfissures en cœur amenant une diminution de ses propriétés.

L'étude du comportement différé de chaque craie a été faite à l'aide d'essais de fluage uniaxial à hygrométrie contrôlée avec ennoyage. Il a été établi entre autre que le fluage dépend de la minéralogie/microstructure et du couple déviateur-hygrométrie mais pas de l'histoire du chargement. Les mécanismes supposés être à l'origine des déformations différées sont d'ordre physico-mécanique et impliquent la rupture et le rétablissement de liaisons électro-statiques.

L'interprétation de tous les essais réalisés a permis de quantifier l'importance des contributions relatives des différents paramètres sur le comportement différé. Le but à long terme reste d'alimenter à la fois l'expertise et les modèles de calculs de sorte à pouvoir prédire notamment l'impact d'une variation du niveau des nappes sur la stabilité à long terme des carrières de craie. Un modèle rhéologique a en ce sens été développé au sein de l'INERIS (Souley et al. 2016).

Mots-clés : craie, carrières souterraines, expérimentation, eau, déformation, rupture, vieillissement, modélisation

Abstract

The risk of instability of underground structures (natural or anthropogenic) involves over 10 000 towns in France. The accidents due to the sudden collapse of underground quarries are among the most destructive, both humanly and materially. The evolution of possible instabilities, since the issues are significant, implies to enrich current knowledge to predict their extent and their impact on the surface. Previous work has demonstrated the importance of the hydro-mechanical coupling in the diagnosis of stability. The complexity of the chalk-water interaction phenomenon is due to many environmental factors and sensitivity to each factor depends entirely on the chalk considered.

The main objective of this thesis is to study the influence of water and water-rock interaction on the mechanical behaviour of three chinks as part of a multi-scale and multi-physics approach.

The study of physical and mechanical characteristics of chinks from three underground quarries situated in the Parisian Basin, and their interaction with water was carried out. The results obtained through short-term hydro-mechanical tests remain consistent with the literature.

The "ageing" of chalk from the underground quarries subjected to fluctuations in the water table has been proven and characterized. It is expressed, based on the chalk considered, by a change in the shape and size of crystals in the microstructure involving improved mechanical properties at the edge of the pillar to the detriment of the heart, or by the presence of traces of dissolution whose frequency increases as one moves from the heart, or by increasing the number of microcracks in the heart causing a decrease in the properties of the chalk.

The study of the long-term behaviour of each chalk was developed through uniaxial creep tests with controlled humidity and waterlogging. It was established among other things that creep depends on the mineralogy / microstructure and the deviatoric stress-humidity couple but not on the loading history. The mechanisms believed to be the origin of creep deformations are of a physico-mechanical nature and involve the breaking and the restoring of electrostatic bonds between grains.

The interpretation of all the tests carried out allowed to quantify the importance of the relative contributions of various parameters on the long-term behaviour. The long-term goal remains to power both the expertise and the model calculations so that one can predict the impact of a particular variation of the groundwater level on the long-term stability of chalk underground quarries. A rheological model has been developed in this direction within the INERIS (Souley et al. 2016).

Keywords: chalk, underground quarries, experiment, water, strain, failure, ageing, modelling