

UNIVERSITÉ DE LILLE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE DE L'INGÉNIERIE ET DES SYSTEMES (ENGSYS-632)

GÉNIE CIVIL, ÉNERGETIQUE, MATÉRIAUX (MGCEM)

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

Spécialité : **GÉNIE CIVIL**

Présentée par

Danielle PAJIEP

**Caractérisation expérimentale et modélisation numérique de
l'influence de la saturation sur le comportement mécanique de
la craie de Château-Landon**

Soutenue publiquement le **11 avril 2024** devant le jury composé de

M. Jean SULEM	Professeur – Ecole des Ponts Paristech	Président
Mme Fanny DESCAMPS	Professeure – Université de Mons	Rapporteur
M. Albert GIRAUD	Professeur – Université de Lorraine	Rapporteur
M. Vincenzo DE GENNARO	Ingénieur de recherche, HDR – Schlumberger	Examineur
M. Jian-Fu SHAO	Professeur – Université de Lille	Directeur
M. Mountaka SOULEY	Ingénieur de recherche, HDR – Ineris	Co-directeur
Mme Nathalie CONIL	Ingénieur de recherche, HDR – Ineris	Co-encadrante

LAMCUBE – UNIVERSITÉ DE LILLE

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse, Jian-Fu Shao et Mountaka Souley, dont l'expertise, le dévouement et le soutien ont été au cœur de cette aventure de recherche. Leur encadrement attentif a été la source de ma progression, de ma confiance et de mon épanouissement scientifique.

Une mention toute particulière revient à Nathalie Conil, dont l'engagement et le soutien infailibles ont été la pierre angulaire de mon cheminement doctoral. Bien plus qu'une encadrante, elle a été une présence constante et bienveillante. Sa passion pour la recherche, sa rigueur méthodologique et son dévouement sans limite m'ont guidé tout au long de cette aventure académique. Chaque discussion avec elle a été un moment de partage intellectuel, de réflexion approfondie et d'inspiration.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Jean Sulem qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail et pour avoir accepté de présider le jury. Mes remerciements vont également à Madame Fanny Deschamps et Monsieur Albert Giroud pour avoir accepté la lourde tâche de rapporteurs et pour leurs précieuses contributions à l'évaluation de ce travail. Je tiens à exprimer ma gratitude envers Monsieur Vincenzo De Gennaro pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour son intérêt pour cette recherche.

Je souhaite également remercier chaleureusement tous mes collègues de l'INERIS, notamment Hippolyte Djizanne, Philippe Gombert, Marwan Al-Heib, Alain Thoroval, Franz Lahaie, Emmanuel Klein, Farid Laouafa, Jannes Kinscher, Francesca De-Santis, Stella Coccia, Cyrille Balland, Isabelle Construcci, Roxanne Muller, Regis Pacot, Nicolas Spitzensteder, Benoit Beaufiles, Catherine Pajor et Virginie Monnier, pour leur soutien, leurs conseils et leurs échanges enrichissants qui ont contribué à l'avancement de ce travail.

Un amical remerciement à tous les membres de l'équipe du laboratoire LamCube ainsi que les doctorants pour leur soutien et la bonne humeur. Mes collègues du laboratoire, en particulier Yuhao Zhang et Wang ont été d'une aide inestimable, partageant généreusement leur expertise, leur expérience et leur soutien.

J'ai eu la chance durant ma dernière année de thèse de la passer à Nancy où j'ai côtoyé dans le même bâtiment tous les membres de l'équipe GOR du laboratoire GeoRessources. Mes remerciements vont donc à Olivier Deck, Jacques Pironon, Yann Gunzberger, Marianne Conin, Rasool Mehdizadeh, Audrey Bonnelye et Delphine Faure-Cattelain pour leur bienveillance et encouragements ainsi que les nombreux débats et moments mémorables passés ensemble et aux pause cafés.

Je tiens à remercier tous les thésards ayant fait avec moi un bout du chemin à l'université de Lille comme à l'université de Lorraine. Un immense merci à Kamel, Emilio, Emeline, Nina, Antoine, Mariam, Rachit à Nancy mais aussi Mathis, Valentin, Anne Sophie, Yudan, Meng, Liping, Yunlong, Yunchang, Zhou, Estella, Yushu, Hongzhuo, Wang à Lille.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers mes amis et ma famille pour leur soutien et leur compréhension tout au long de cette aventure académique. Leur présence et leurs encouragements ont été un moteur essentiel dans les moments de doute et d'intense travail.

Résumé

Avec le changement climatique et devant le risque accru de crues exceptionnelles, se pose aujourd'hui la question de la stabilité des carrières souterraines anciennement exploitées et aujourd'hui laissées à l'abandon. C'est notamment le cas de la carrière de craie Royer à Château-Landon (Seine-et-Marne), présentant des similitudes géologiques et géotechniques avec la carrière de craie Beaulieu effondrée en janvier 1910 à la suite de précipitations extrêmes. L'objectif de cette thèse est d'étudier les effets des variations du degré de saturation en eau du massif sur le comportement mécanique de la craie de Château-Landon. La réponse mécanique de la craie de Château-Landon partiellement et totalement saturée a été étudiée expérimentalement avec des essais de compression hydrostatique, triaxiale et de fluage. Les essais ont été menés sous différents niveaux de contrainte et de saturation en conditions drainées. Les résultats confirment la sensibilité de cette craie à l'eau et mettent en évidence le passage d'un comportement élastoplastique fragile à ductile en fonction de la saturation et de la pression de confinement. Un mécanisme de pore collapse est mis en évidence avec les essais hydrostatiques, la limite de pore collapse diminuant avec le degré de saturation. Un modèle basé sur la micromécanique prenant en compte les mécanismes plastiques liés à la microstructure de la craie poreuse ainsi que l'influence de la saturation a été proposé. Pour valider ce modèle de comportement, plusieurs simulations ont été effectuées et comparées aux données expérimentales. Les résultats ont montré que le modèle proposé permet de décrire correctement l'influence de la teneur en eau sur le comportement mécanique de la craie de Château-Landon.

Mots clés : changement climatique, carrière souterraine, craie, saturation en eau, simulation numérique

Abstract

With climate change and the increased risk of exceptional floods, the stability of underground quarries, formerly exploited and now abandoned, is a pressing concern. This is notably the case with the Royer chalk mine in Château-Landon (Seine-et-Marne), sharing geological and geotechnical similarities with the Beaulieu chalk mine that collapsed in January 1910 following extreme precipitation. The objective of this thesis is to investigate the effects of changes in water saturation on the mechanical behavior of Château-Landon chalk. The mechanical response of partially and fully saturated Château-Landon chalk was studied experimentally through hydrostatic compression, triaxial, and creep tests. Tests were conducted under different stress levels and drainage conditions. The results confirm the chalk's sensitivity to water and reveal a transition from a brittle elastoplastic behavior to ductile behavior depending on saturation and confining pressure. A pore collapse mechanism is identified on hydrostatic tests, with the limit of pore collapse decreasing with saturation. A micromechanical model considering plastic mechanisms related to the porous microstructure of chalk was proposed. To validate this behavior model, several simulations were conducted and compared to experimental data. The results demonstrate that the proposed model accurately describes the influence of water content on the mechanical behavior of Château-Landon chalk.

Keywords: climate change, underground quarry, chalk, water saturation, constitutive model, numerical simulation.

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
Sommaire	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Problématique des carrières souterraines abandonnées	4
1.1. Introduction.....	5
1.2. Carrières souterraines en France.....	5
1.3. Dégradation des carrières souterraines abandonnées	8
1.3.1. Facteurs de prédisposition.....	8
1.3.2. Facteurs aggravants	9
1.3.3. Facteurs anthropiques.....	12
1.4. Aléas liés à l'existence des carrières souterraines abandonnées	13
1.4.1. Affaissements	13
1.4.2. Effondrements localisés	14
1.4.3. Effondrements généralisés	15
1.5. Impact de l'eau sur les carrières souterraines abandonnées	16
1.5.1. Effet de l'eau sur la résistance mécanique de la roche.....	16
1.5.2. Effet de l'eau sur les discontinuités.....	17
1.5.3. Etude de cas : l'effondrement de la carrière Beaulieu à Château-Landon en 1910.....	17
1.6. Carrière Royer	20
1.6.1. Description du site.....	20

1.6.2.	Contexte général de l'étude.....	23
1.6.3.	Mesures in-situ dans la carrière Royer.....	27
1.7.	Conclusion.....	30
Chapitre 2 : Craie – origine, caractérisation et modélisation		31
2.1.	Introduction.....	32
2.2.	Généralités	32
2.2.1.	Origine et formation.....	32
2.2.2.	Composition minéralogique et chimique	33
2.2.3.	Analyse microstructurale au MEB de la craie.....	34
2.2.4.	Propriétés physiques.....	36
2.3.	Comportement mécanique de la craie.....	38
2.3.1.	Caractérisation mécanique à court terme	38
2.3.2.	Comportement mécanique à long terme.....	40
2.3.3.	Influence de la porosité	42
2.3.4.	Influence du fluide saturant.....	43
2.4.	La craie de Château-Landon.....	46
2.4.1.	Minéralogie, pétrographie et propriétés physiques	46
2.4.2.	Isotherme de sorption et courbe de rétention	50
2.4.3.	Propriétés mécaniques.....	52
2.5.	Modèles de comportement de la craie	54
2.5.1.	Modèles élastoplastiques.....	55
2.5.2.	Modèles visco-élastoplastiques	57
2.5.3.	Modèles dépendant du fluide saturant.....	58
2.5.4.	Modèles de comportement basés sur la micromécanique	60
2.6.	Conclusion.....	61

Chapitre 3 : Etude expérimentale du comportement de la craie de Château-Landon - influence de la saturation	62
3.1. Introduction.....	63
3.2. Campagne de prélèvement d'échantillons in-situ.....	63
3.3. Conditions expérimentales.....	66
3.3.1. Préparation des éprouvettes en laboratoire.....	66
3.3.2. Saturation des éprouvettes.....	67
3.3.3. Dispositif expérimental	69
3.3.4. Système de mesure des déformations.....	70
3.4. Méthodologie d'étude et programme d'essais.....	71
3.5. Etude expérimentale du comportement mécanique de la craie de Château-Landon	72
3.5.1. Caractérisation physique	72
3.5.2. Isotherme de sorption et courbe de rétention	73
3.5.3. Essais hydrostatiques.....	75
3.5.4. Essais triaxiaux.....	76
3.5.5. Essais de fluage	79
3.5.6. Discussion	81
3.6. Conclusion	85
Chapitre 4 : Modélisation du comportement de la craie de Château-Landon	86
4.1. Introduction.....	87
4.2. Choix de l'approche pour un modèle de comportement pour la craie de Château Landon	87
4.3. Formulation du modèle basé sur la micromécanique	89
4.3.1. Microstructure et propriétés élastiques effectives.....	89
4.3.2. Critère de plasticité.....	90
4.3.3. Loi d'écroutissement	94

4.3.4. Évolution de la porosité.....	95
4.3.5. Loi d'écoulement plastique	96
4.4. Analyse de sensibilité du modèle	97
4.5. Identification des paramètres du modèle	99
4.6. Simulation des essais de laboratoire pour un état totalement saturé de la craie de Château-Landon ($S_w=100\%$).....	101
4.7. Prise en compte de la saturation dans le modèle	103
4.7.1. Evolution de la loi d'écrouissage	103
4.7.2. Simulation des essais en laboratoire et comparaison	104
4.8. Conclusion	106
Conclusion générale et perspectives	107
Références bibliographiques	110

Liste des figures

Figure 1.1 Site de la Corderie à Marseille, extraction du calcaire dit « de Saint-Victor » laissant des traces sur près de 6 m de haut (Mellinand et al. 2020)	6
Figure 1.2 Les cavités souterraines (points noirs) répertoriées sur le territoire français, mises en relation avec la géologie (Bérenger 2017).....	7
Figure 1.3 Schéma des différents types d'accès des carrières souterraines (Bérenger et al. 2014)	8
Figure 1.4 Désordres au toit de carrière causés par la croissance des racines (Bérenger et al. 2014).....	10
Figure 1.5 Zonage sismique de la France (Balland et al. 2017).....	11
Figure 1.6 Affaissement à l'aplomb d'une carrière souterraine à Meigné (49) (Bérenger et al. 2014).....	14
Figure 1.7 Fontis à Gagny en 1974 (Seine-Saint-Denis) (Pomerol 1988)	15
Figure 1.8 Effondrement généralisée à l'aplomb d'une carrière de craie (Indre-et-Loire) (Ramadan 2016)	15
Figure 1.9 Résistance à la compression uniaxiale en fonction du degré de saturation (Watelet 1996).....	16
Figure 1.10 Vue de l'effondrement de la carrière Beaulieu le long de la faille traversante (source Archives DRIEE IdF)	18
Figure 1.11 Pluviométrie et hydrologie journalière à Nemours au cours des deux mois précédant l'effondrement du 21/01/1910 (Conil et al. 2023).....	20
Figure 1.12 Localisation des carrières de craies de craie abandonnées à Château-Landon : carrières effondrées (bleu) et la carrière Royer (rouge) (Pajiep et al. 2024).....	21
Figure 1.13 Coupe géologique du site de Château-Landon (Conil 2023).....	22
Figure 1.14 Scan 3D de la carrière Royer (Renaud et al. 2019).....	23
Figure 1.15 Vue des désordres constatés après l'évènement hydroclimatique extrême de juin 2016, affectant une faille (à gauche) et tassant les maçonneries par remobilisation des remblais à la base des galeries (à droite) (Conil 2024)	24
Figure 1.16 Localisation schématique des cours d'eau autour des carrières Beaulieu et Royer (Conil 2024)	25
Figure 1.17 Localisation de l'instrumentation mise en place dans la carrière Royer (Conil 2024)	26

Figure 1.18 Mesures d'humidité relative (bleu) et de température (vert) dans la carrière Royer (Conil 2024)	27
Figure 1.19 Mesures des teneurs en eau volumique dans la carrière Royer en fonction des zones (Conil 2024)	28
Figure 1.20 Niveau d'eau dans les sondages piézométriques ainsi que dans le Loing (Conil 2024).....	29
Figure 2.1 Observations au M.E.B des coccolithes (Delebecque 2017)	33
Figure 2.2 Image au MEB de la craie d'Estreux (Sorgi et De Gennaro 2007)	35
Figure 2.3 Courbes de répartition des pores mesurée sur 13 craies françaises (Masson 1973)	36
Figure 2.4 Essai de compression hydrostatique de la craie de Lixhe (Xie 2005)	38
Figure 2.5 Essais de compression triaxiale sur la craie d'Estreux (Nord) à : (a) 98% d'humidité relative et (b) à l'état sec (Lafrance 2016)	39
Figure 2.6 Illustration des 3 phases de fluage en fonction du temps, se produisant généralement sur les géomatériaux	41
Figure 2.7 Essais de fluage triaxial sous pression de confinement de 2 MPa et différentes contraintes déviatoriques sur la craie de Lixhe (Xie 2005).....	41
Figure 2.8 Modèle conceptuel des liaisons inter-particulaires pour une craie de Mer du Nord (Risnes et Flaageng 1999, Schroeder 2002).....	43
Figure 2.9 Essais de compression hydrostatique sur des craies de Pietra Lecesse à différents degrés de saturation en eau (Papamichos et al. 1997).....	44
Figure 2.10 Surfaces de charge fermées d'une craie (sèche, saturée à l'huile et à l'eau) (Collin et al. 2002).....	45
Figure 2.11 Essais de fluage sur la craie de Haubourdin saturées par différents fluides (Schroeder et Shao 1996)	45
Figure 2.12 Analyses microscopiques de la craie de Château-Landon à l'aide de lames minces (Lafrance 2016).....	47
Figure 2.13 Porosimétrie de la craie de Château-Landon (Munoz-Castelblanco et al. 2011).....	49
Figure 2.14 Photographies au MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier (Lafrance 2016).....	49
Figure 2.15 Isotherme de sorption de la craie de Château-Landon (Lafrance 2016).....	50
Figure 2.16 Courbes de rétention d'eau de la craie de Château-Landon (Munoz-Castelblanco et al. 2011).....	51

Figure 2.17 Essais de compression simple à différents degrés de saturation de 60%, 86%, 92%, 97% et 100% (Munoz-Castelblanco et al. 2011).....	52
Figure 2.18 Courbes contrainte-déformation de deux essais de compression uniaxiale pour un état sec et saturé (Lafrance 2016).....	53
Figure 2.19 Courbes contrainte-déformation de deux essais de compression triaxiale à 1 et 3 MPa de confinement à l'état sec (Lafrance 2016).....	53
Figure 2.20 Courbes de fluage sur un échantillon de craie partiellement saturé (Lafrance 2016).....	54
Figure 2.21 Surface de charge multi-mécanisme d'un modèle élastoplastique (Nguyen 2009).....	56
Figure 2.22 Surface de référence du modèle de De Gennaro et al. (2003).....	58
Figure 2.23 Surfaces de charge du modèle de Homand et Shao (2000).....	60
Figure 3.1 Forages réalisés lors des deux campagnes de prélèvement : la première campagne à gauche et la deuxième à droite avec un diamètre plus grand.....	64
Figure 3.2 Carottes prélevées in-situ.....	64
Figure 3.3 Localisation des zones 1 et 2 où ont été réalisés les prélèvements de carottes.....	65
Figure 3.4 Scie à fil diamantée.....	66
Figure 3.5 Chambre hermétique contenant les solutions salines et appareil de mesure numérique de l'humidité relative relié à chaque chambre.....	67
Figure 3.6 Dispositif expérimental.....	69
Figure 3.7 Illustration des conditions expérimentales.....	70
Figure 3.8 Isotherme d'adsorption de la craie de Château-Landon à 20°C (Pajiep et al. 2024).....	73
Figure 3.9 Courbe de rétention en eau de la craie de Château-Landon : porosimétrie (rouge) et tensiomètre (noir) représentant le chemin d'humidification (modifié d'après Munoz-Castelblanco et al. (2011) et points expérimentaux (croix rouges) et état hydrique in-situ (53,5kPa ; 29%) (croix bleue).....	74
Figure 3.10 Comportement hydrostatique de la craie de Château-Landon à différents degrés de saturation (Pajiep et al. 2024).....	75
Figure 3.11 Essai triaxial drainé à différents degrés de saturation et un confinement de 0.5 MPa : déformations volumiques en pointillées (Pajiep et al. 2024).....	76
Figure 3.12 Essais triaxiaux drainés à différentes pressions de confinement ($S_w = 100\%$) (Pajiep et al. 2024).....	77

Figure 3.13 Essais triaxiaux drainés à différentes pressions de confinement ($S_w = 100\%$) (Pajiep et al. 2024).....	78
Figure 3.14 Evolution des déformations volumiques à différentes pressions de confinement ($S_w=100\%$) (Pajiep et al. 2024)	78
Figure 3.15 Essais de fluage sous deux degrés de saturation 40% et 100% (Pajiep et al. 2024)	80
Figure 3.16 Evolution du seuil de plasticité initial avec le degré de saturation en compression hydrostatique (Pajiep et al. 2024).....	82
Figure 3.17 Evolution du module de compressibilité avec le degré de saturation en compression hydrostatique (Pajiep et al. 2024).....	83
Figure 3.18 Influence de la pression de confinement sur les propriétés élastiques ($S_w=100\%$) (Pajiep et al. 2024).....	84
Figure 4.1. Schématisation du milieu poreux (Chao et al. 2022).....	90
Figure 4.2 Cellule de sphère creuse avec des conditions limites de vitesse de déformation uniforme (Kondo, 2019).....	91
Figure 4.3 Les deux branches de la fonction W de Lambert, $y = W_0(x)$ et $y = W - 1(x)$ (Monchiet et Kondo 2012)	93
Figure 4.4 Représentation des coefficients p en fonction de α (Monchiet et Kondo, 2012)..	94
Figure 4.5 Effet de la porosité Φ sur la surface de charge macroscopique.....	98
Figure 4.6 Effet du paramètre α sur la surface de charge macroscopique	98
Figure 4.7 Effet du paramètre σ_0 sur la surface de charge macroscopique	99
Figure 4.8 Surface de charge initiale de la craie de Château-Landon ($S_w = 100\%$).....	100
Figure 4.9 Simulation de l'essai de compression hydrostatique de la craie saturée à l'eau. 101	
Figure 4.10 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 100% (1MPa)	102
Figure 4.11 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 100% (1.5MPa).....	102
Figure 4.12 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 100% (3MPa)	103
Figure 4.13 Variation du seuil plastique en fonction de la saturation en eau.....	104
Figure 4.14 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 40% (0.5MPa)	105

Figure 4.15 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 90% (0.5MPa)	105
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Synthèse des propriétés physiques de quelques craies (Lafrance 2016)	37
Tableau 2.2 Propriétés physiques de la craie de Château-Landon (Lafrance 2016)	48
Tableau 3.1 Caractéristiques des sondages : la zone 1 en bleu correspond à celle où les forages pour la thèse de Lafrance (2016) avaient été réalisés et la zone 2 en rouge correspond à un autre pilier choisi dans la carrière où aucun silex n'était retrouvé	65
Tableau 3.2 Humidités relatives associées aux solutions salines	68
Tableau 3.3 Programme expérimental des essais	71
Tableau 3.4 Etude comparative des propriétés physiques de la craie de Château-Landon....	72
Tableau 4.1 Valeurs des paramètres utilisés pour l'étude de la sensibilité du modèle	97
Tableau 4.2 Valeur des paramètres du modèle pour la craie de Château-Landon saturée à l'eau (Sw = 100%).....	100

Introduction générale

L'évaluation des risques liés aux ouvrages souterrains (carrières, mines, cavités naturelles) en cours d'exploitation ou abandonnés, soulève des interrogations cruciales concernant leur stabilité à long terme. Au fil des décennies, la France a connu une activité intense d'extraction de ressources du sous-sol, notamment à travers un vaste réseau de carrières souterraines réparties sur l'ensemble du territoire. Ces carrières ont joué un rôle essentiel dans le développement du pays, fournissant les matériaux de base indispensables pour les infrastructures, les bâtiments, les routes ainsi que pour diverses industries. Toutefois, leur exploitation a laissé des traces profondes, suscitant aujourd'hui des préoccupations majeures quant à leur impact et leur tenue à long terme.

De nombreuses carrières ont été laissées à l'abandon sans suivi adéquat, engendrant ainsi des risques de subsidence, d'effondrement et de détérioration des structures environnantes. Ces instabilités sont aggravées par les conditions géologiques hétérogènes, rendant difficile la prédiction et la prévention de ces phénomènes. De plus, la proximité de certaines carrières avec des zones urbanisées suscite des inquiétudes quant à la sécurité des populations et des infrastructures. Avec le changement climatique et la menace croissante d'évènements climatiques exceptionnels (crues, précipitations, sécheresses, ...), ces ouvrages souterrains sont confrontés à des risques accrus, soulevant ainsi la nécessité de comprendre et de maîtriser les mécanismes à l'origine de leur instabilité.

Cette thèse se concentre spécifiquement sur les carrières souterraines de craie abandonnées, soumises à des sollicitations hydromécaniques, notamment des périodes d'humidification/séchage et/ou d'ennoyage/dénoyage en lien avec les variations saisonnières.

L'effondrement survenu en janvier 1910 dans la carrière souterraine de craie "Beaulieu" à Château-Landon (Seine-et-Marne), consécutif à des précipitations et à la crue du Loing, a engendré un glissement de terrain majeur (Kreziak et Watelet 2016, Conil et al. 2023). Cet événement a causé la perte de sept vies humaines et détruit plusieurs habitations. La seule carrière non effondrée du secteur, la carrière Royer, voisine de la carrière Beaulieu, a été choisie comme site pilote par l'Ineris en raison de ses similarités géologiques et géomécaniques avec la carrière effondrée. Depuis 2020, elle fait l'objet d'une instrumentation complète visant à surveiller les paramètres hydromécaniques et hydrogéologiques, permettant

ainsi d'étudier les interactions entre l'eau et la roche pour mieux appréhender le fonctionnement hydrogéologique de la carrière et évaluer les impacts des circulations d'eau sur sa stabilité.

Face aux conséquences graves d'un effondrement majeur, la compréhension des phénomènes hydromécaniques à l'origine du comportement de cette craie s'avère essentielle. Malgré les études antérieures sur la craie de Château-Landon (Munoz-Castelblanco et al. 2011, Lafrance 2016), peu de données exploitables ont pu être collectées en raison de la forte sensibilité de cette roche à l'eau, rendant les essais de laboratoire difficilement exploitables malgré l'utilisation d'une métrologie expérimentale spécifique.

Les principaux objectifs de cette recherche résident dans l'approfondissement des connaissances du comportement mécanique de la craie de Château-Landon soumise à des sollicitations mécaniques et dans le développement d'une approche de modélisation numérique adéquate. Les travaux réalisés au cours de cette thèse visent à compléter la base de données expérimentales existantes et à analyser les mécanismes d'interaction entre l'eau et la craie, qui sont fondamentaux pour comprendre son comportement rhéologique.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'axe de recherche COMPASS de l'Ineris, axé sur l'impact du vieillissement et du changement climatique sur la stabilité des ouvrages souterrains et en particulier dans le thème relatif à la « Compréhension des mécanismes d'instabilité et de développement des désordres liés aux cavités » en lien avec les études menées dans le cadre du programme d'appui au ministère de l'environnement, SIT-19 : « Amélioration de la connaissance des mécanismes d'instabilité et de l'impact du changement climatique sur les cavités ».

Ce mémoire de thèse est articulé autour de quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre expose la problématique des carrières souterraines abandonnées, abordant leur histoire, leur répartition, les risques de dégradation et les facteurs impactant leur stabilité, en se focalisant sur la carrière Royer d'où sont issus les échantillons testés.
- Le deuxième chapitre se concentre sur la caractérisation globale de la craie, incluant sa composition minéralogique, sa caractérisation physique et mécanique. Un état de l'art sur les modèles de comportement associés à cette roche est également présenté.
- Le troisième chapitre présente l'étude expérimentale du comportement mécanique de la craie de Château-Landon, à travers des essais hydrostatiques, triaxiaux et de fluage, analysant

l'impact de la saturation, du temps et de la pression de confinement sur son comportement à court et long terme.

- Enfin, le dernier chapitre propose un modèle de comportement micromécanique prenant en compte la saturation et la porosité. Ce modèle est utilisé pour reproduire le comportement de la craie étudiée au moyen des résultats expérimentaux obtenus en laboratoire.

Chapitre 1 : Problématique des carrières souterraines abandonnées

Table de matière

1.1.	Introduction.....	5
1.2.	Carrières souterraines en France.....	5
1.3.	Dégradation des carrières souterraines abandonnées	8
1.4.	Aléas liés à l'existence des carrières souterraines abandonnées	13
1.5.	Impact de l'eau sur les carrières souterraines abandonnées	16
1.6.	Carrière Royer	20
1.7.	Conclusion	30

1.1. Introduction

Les carrières souterraines, vestiges d'une activité minière ancienne, représentent un héritage historique et géologique significatif en France. Cependant, leur abandon et leur dégradation posent des défis complexes, allant de la préservation de l'environnement à la sécurité publique. Ces carrières, témoins silencieux du passé industriel, sont souvent négligées, laissant derrière elles des questions cruciales quant à leur gestion et leur impact sur la société.

Ce premier chapitre de la thèse s'attache à introduire et à contextualiser le sujet des carrières souterraines abandonnées en France, en explorant leur complexité depuis leur historique jusqu'à leur état actuel post-abandon. La diversité des carrières souterraines est d'abord abordée à travers une analyse de leur typologie, mettant en évidence les variations géométriques et structurales. Ensuite, les différentes méthodes d'exploitation au fil du temps sont examinées, mettant en lumière les pratiques traditionnelles et modernes. Une attention particulière est accordée aux facteurs de dégradation, aux mécanismes associés qui conduisent à la perte de stabilité et plus particulièrement à l'impact de l'eau sur leur stabilité. Enfin, une étude de cas est présentée se terminant par une présentation du contexte général de cette étude.

1.2. Carrières souterraines en France

Le sous-sol français est constitué de nombreuses carrières souterraines abandonnées depuis des décennies voire des siècles. Les premières traces d'exploitation remontent à l'Antiquité, les romains étaient les premiers à les exploiter. Ces premières carrières, souvent creusées dans la pierre calcaire, ont été témoins des avancées techniques de l'époque. À part quelques cas isolés d'exploitations souterraines, l'exploitation de ces carrières se faisait principalement à ciel ouvert (Figure 1.1).

Au cours du Moyen Âge, l'exploitation des carrières souterraines s'est intensifiée, alimentant la construction des cathédrales, des châteaux et des fortifications qui caractérisent le paysage architectural français. Les régions riches en calcaire, comme la région parisienne, la Champagne ou la Bourgogne, ont connu un essor significatif de l'extraction de la pierre (Delsalle 1993). À l'époque moderne, la Révolution industrielle a marqué un tournant majeur dans l'exploitation des carrières souterraines en France. La demande croissante en matériaux de construction et en ressources minérales a entraîné une expansion rapide de l'extraction dans différentes régions du pays. Le XIXe siècle a été une période d'essor pour les carrières, avec l'avènement de nouvelles techniques d'extraction et de transport. La pierre extraite a été largement utilisée dans la construction des grandes métropoles françaises telles que Paris,

Lyon, Marseille, et dans les infrastructures ferroviaires qui se développaient à cette époque. Les carrières souterraines étaient souvent utilisées comme refuges pendant les guerres, notamment lors de la Première et de la Seconde Guerre mondiale. Au XXe siècle, l'industrie des carrières a connu une évolution marquée par l'introduction des machines modernes et l'industrialisation croissante du processus d'extraction. Cependant, le déclin progressif de nombreuses carrières est survenu pour plusieurs raisons : épuisement des gisements, concurrence étrangère, changements dans les matériaux de construction et réglementations environnementales de plus en plus strictes (Augereau et al. 2018).

Aujourd'hui, certaines carrières en France sont encore en activité, tandis que la plupart sont abandonnées et quelques-unes ont trouvé de nouvelles utilisations, telles que l'agriculture (caves vinicoles, culture des champignons, etc.), le tourisme (musées, restaurants, etc.) ou encore pour l'industrie (zones de stockage). Un exemple bien connu est la région de la Champagne, où de nombreuses caves à vin creusées dans la craie servent de stockage pour le vieillissement du champagne. Les anciennes carrières qui n'étaient plus exploitées ont été recouvertes par l'étendue urbaine. Leur existence a été oubliée de tous jusqu'au XVIIIe siècle où nombre d'affaissements de terrain ont fait prendre conscience du danger que représentaient ces anciennes exploitations pour la stabilité du sol.



Figure 1.1 Site de la Corderie à Marseille, extraction du calcaire dit « de Saint-Victor » laissant des traces sur près de 6 m de haut (Mellinand et al. 2020)

Avec le soutien du ministère de l'Environnement et du Ministère de la Recherche, la base de données nationale **Géorisques** (www.georisques.gouv.fr) a recensé les cavités souterraines abandonnées (hors mines) sur l'ensemble du territoire métropolitain (Figure 1.2). Les cavités souterraines comprennent les cavités naturelles (provenant pour l'essentiel de la dissolution des roches carbonatées ou sulfatées), les carrières souterraines, les caves, ouvrages civils et militaires. L'inventaire des anciennes carrières recense un peu de plus de 5000 communes concernées par la présence d'une ancienne exploitation souterraine et plusieurs centaines de milliers potentiellement présentes dans le sous-sol français (Pinon et al. 2022). En matière de cavités naturelles, les régions calcaires sont les plus concernées (Alpes, Causses, Jura, Pyrénées), mais également les vastes ensembles gypseux de l'agglomération parisienne. En ce qui concerne les carrières souterraines, l'urbanisation ancienne de l'Île-de-France et du val de Loire (pierre à bâtir et gypse) en font des régions particulièrement affectées. Les marnières, petites carrières souterraines dans la craie servant à l'amendement des champs, sont fréquentes en Normandie et en Picardie (Commissariat général au développement durable 2020).

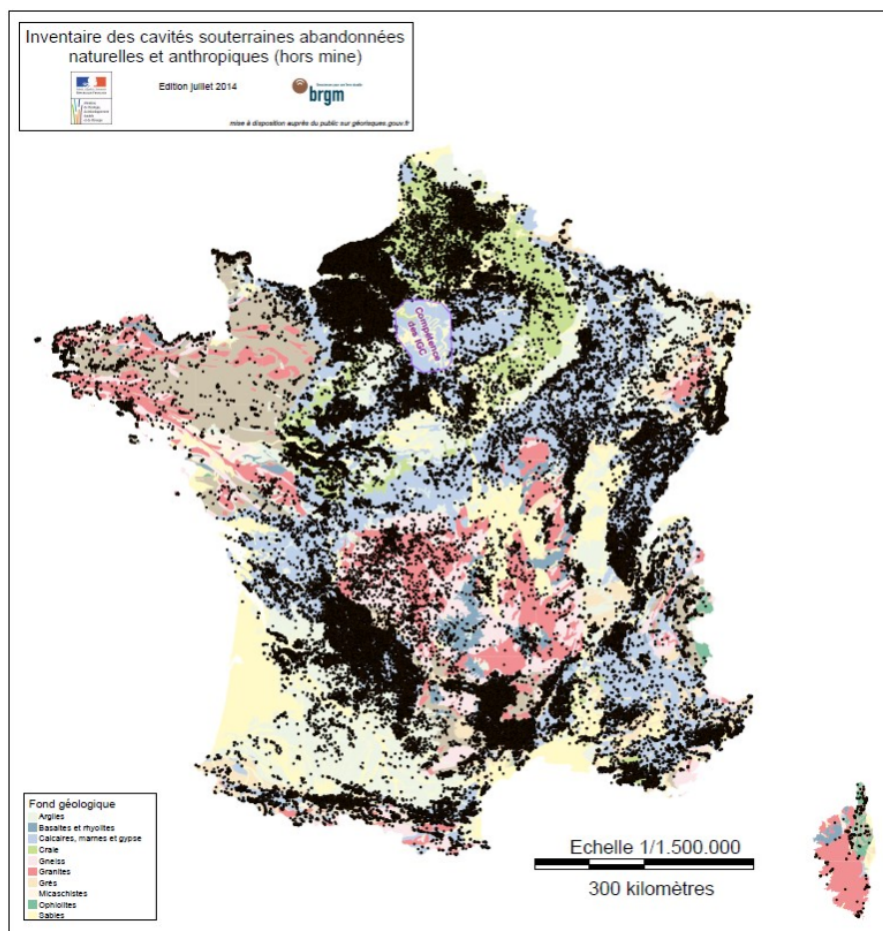


Figure 1.2 Les cavités souterraines (points noirs) répertoriées sur le territoire français, mises en relation avec la géologie (Bérenger 2017)

Les carrières souterraines présentent des configurations diverses liées à la topographie, la géologie, aux caractéristiques mécaniques du matériau extrait et des méthodes d'exploitations utilisées. Le choix d'exploiter en souterrain ou à ciel ouvert est conditionné par la géologie, au travers de l'épaisseur des formations géologiques et superficielles. Par ailleurs, le niveau de la nappe phréatique limitait la profondeur de l'exploitation (au maximum, 30 à 35 m). Exceptionnellement, elle peut atteindre une soixantaine de mètres comme pour la craie de Clamart ou d'Issy les Moulineaux ou être inférieure à 5 m comme en Gironde (Tritsch 2005).

L'accès dans la carrière se fait généralement soit par un puits ou une descenderie dans le cas des carrières implantées sur un plateau, soit par une entrée à flanc de coteau dite « entrée en cavage » ou depuis un front de taille d'une première exploitation à ciel ouvert (Figure 1.3). La hauteur exploitée ou « ouverture » et la largeur des galeries (ou des chambres) sont très variables et dépendent de la résistance du matériau en particulier de la tenue des piliers et de la qualité du toit. La largeur des galeries est généralement comprise entre 3 et 15 mètres tandis que la hauteur des vides peut atteindre jusqu'à 15 à 20 mètres (Tritsch 2005).

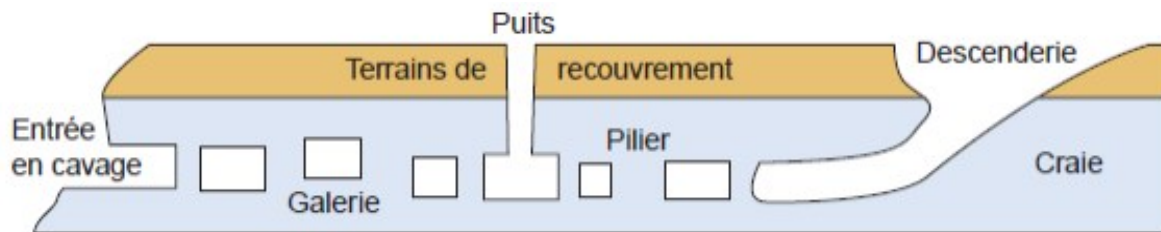


Figure 1.3 Schéma des différents types d'accès des carrières souterraines (Bérenger et al. 2014)

1.3. Dégradation des carrières souterraines abandonnées

Le processus de dégradation des carrières est engagé dès la création des vides. Celui-ci induit alors une redistribution des conditions naturelles influencées par différents facteurs.

1.3.1. Facteurs de prédisposition

Ce sont les facteurs liés aux conditions naturelles et d'exploitation de la carrière. On distingue :

- les propriétés mécaniques du matériau exploité : suivant les caractéristiques géomécaniques du matériau exploité et des terrains de recouvrement (roche plus ou moins résistante qui évoluera soit en se déformant, soit en se rompant), les désordres seront différents.

- la géométrie de la carrière : le dimensionnement de la carrière et l'agencement des chambres et galeries par exemple, a une incidence directe sur la stabilité de la carrière. A titre d'exemple, l'existence d'une portée excessive, d'un toit « plat », d'un nombre insuffisant de piliers ou une mauvaise superposition entre deux niveaux d'exploitation sont de nature à compromettre l'intégrité et la stabilité de la carrière.
- la méthode d'exploitation : la technique utilisée pour extraire le matériau joue également un rôle dans la stabilité de celle-ci. Par exemple l'utilisation des explosifs entraîne parfois des éclatements superficiels contrairement à l'extraction manuelle qui est moins agressive.

1.3.2. Facteurs aggravants

1.3.2.1. Eau

L'eau peut être un facteur déclencheur ou aggravant. On distingue les eaux d'origine météorologique (eaux de pluie, neige), les eaux d'origine anthropique (eau usée, réseau d'eau potable, eau provenant des assainissements) et les eaux souterraines (nappes phréatiques). La présence d'eau peut avoir une grande influence sur les propriétés mécaniques des matériaux exploités, des terrains de recouvrement et du toit immédiat, et donc sur la stabilité des carrières (Nguyen 2009, Lafrance 2016). La chimie de l'eau joue elle aussi un rôle important. Lors de circulations par exemple, elle peut entraîner le transport de particules fines argileuses ou siliceuses du sol, susceptible de provoquer l'apparition de décompression dans les terrains traversés.

1.3.2.2. Discontinuités

Ce sont généralement des fractures, fissures ou encore des joints, qui servent de plans de faiblesse préférentiels pour le développement d'instabilités. De plus, ces zones agissent comme des voies privilégiées pour la circulation de l'eau et le transport de substances chimiques, pouvant ainsi exercer une influence significative sur l'équilibre ionique environnant. Elles se présentent naturellement dans le matériau, en lien avec son histoire géologique ou son contexte topographique (fractures de décompression le long d'un versant par exemple).

1.3.2.3. Fluage et vieillissement

Le fluage est un processus de déformation lent et continu ayant une influence sur le comportement des piliers et des toits-murs immédiats des carrières. Plusieurs facteurs

influencent ce phénomène à savoir : les contraintes appliquées, la nature du matériau, la teneur en eau et la température. L'effet du fluage est largement dominant dans les carrières saturées en eau entraînant notamment la dégradation de la roche (Auvray et al. 2003, Priol et al. 2004).

Le vieillissement quant à lui est un phénomène d'évolution lente et irréversible au cours du temps des propriétés physiques et mécaniques. Dans le cas des carrières souterraines, il s'agit de l'évolution des caractéristiques dans le temps après exploitation. Ce phénomène peut avoir un effet positif sur la stabilité des carrières souterraines mais la plupart du temps un effet négatif (si la roche évolue dans un milieu oxydant par exemple entraînant détérioration des propriétés du cœur en bord de pilier)

1.3.2.4. Végétation

La végétation peut avoir un effet positif puisqu'elle permet l'évacuation d'une partie des eaux infiltrées dans les terrains de recouvrement. Mais le plus souvent elle a un effet néfaste sur la stabilité de la carrière souterraine et notamment dans les carrières souterraines peu profondes (Pédini 2013). La croissance des racines est plus importante dans les discontinuités rocheuses humides. Les racines pénètrent dans les fissures existantes de la carrière et génèrent des variations de contraintes environnantes : élargissement des fissures, dégradation de la roche et pénétration de l'eau à l'intérieur des carrières souterraines (Figure 1.4). Après leur décomposition, les racines laissent ouvertes des discontinuités dans la roche favorisant le ruissellement des eaux.

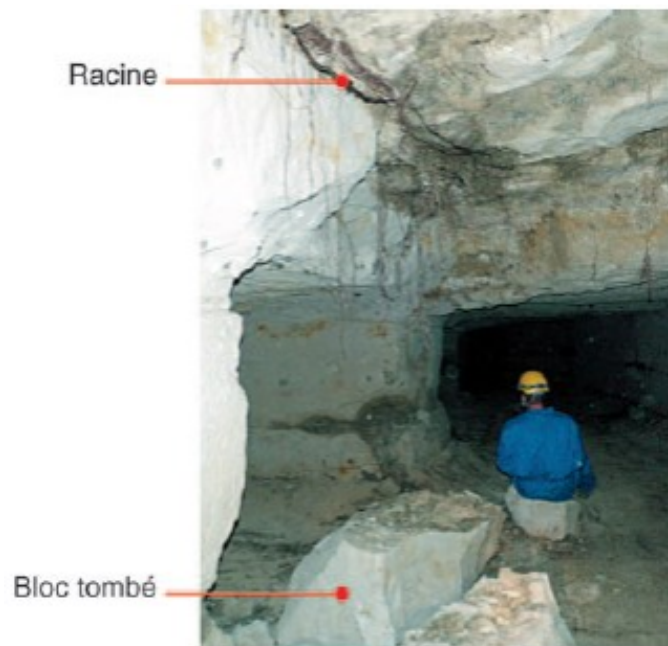


Figure 1.4 Désordres au toit de carrière causés par la croissance des racines (Bérenger et al. 2014)

1.3.2.5. Activité sismique

L'activité sismique a elle aussi une influence sur la stabilité des carrières souterraines abandonnées notamment celles localisées dans des régions à sismicité élevée (Figure 1.5). Les ondes sismiques peuvent potentiellement modifier les caractéristiques géotechniques des matériaux en place, affaiblissant davantage les structures déjà fragilisées au fil du temps (Ghellab 2020). En raison de la nature souvent disséminée des carrières souterraines abandonnées, la sismicité peut également induire des effets différés, rendant complexe la prévision et la gestion des risques. Les secousses sismiques peuvent agir comme des catalyseurs, accélérant les processus de détérioration déjà amorcés (Bérenger et al. 2014).

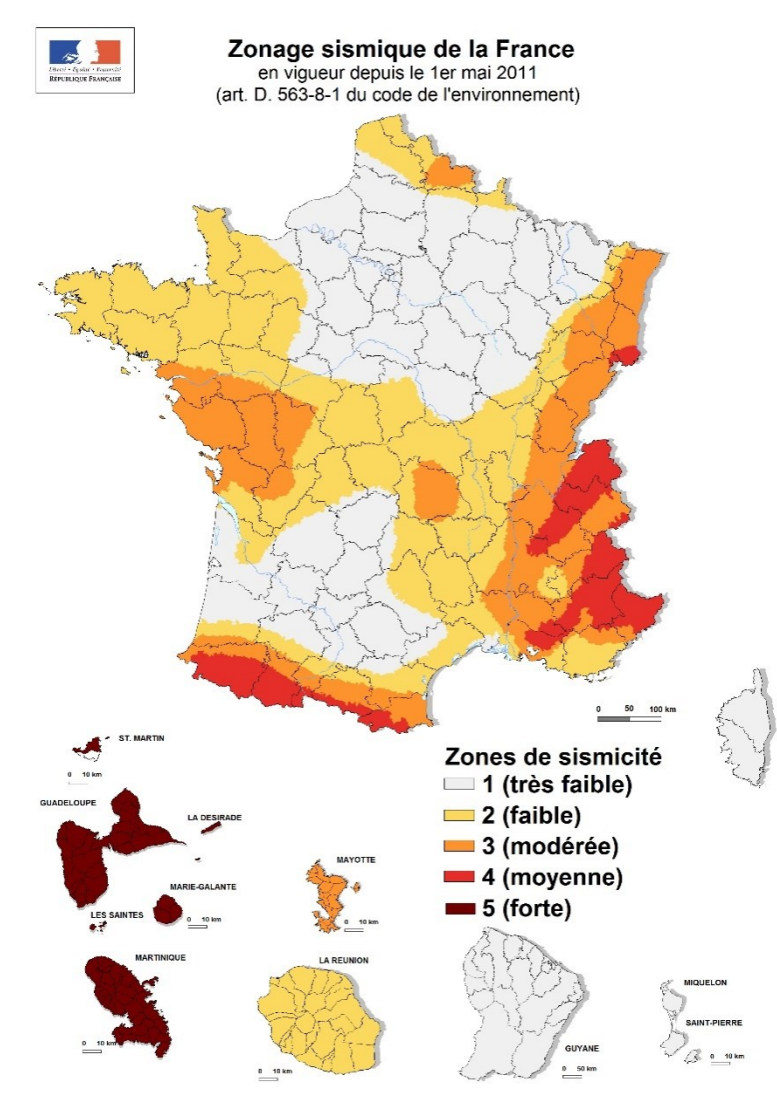


Figure 1.5 Zonage sismique de la France (Balland et al. 2017)

1.3.2.6. Changement climatique

D'après les prévisions du Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC), le réchauffement de l'atmosphère par les gaz à effet de serre induit des phénomènes tels que l'élévation des températures et la modification du régime des précipitations. Une augmentation en volume des précipitations est mise en évidence, ainsi qu'une plus grande disparité régionale des précipitations et un accroissement des contrastes saisonniers (Krunner et al. 2023). Les précipitations hivernales augmenteraient, tandis que les précipitations estivales diminueraient ; la survenue d'événements pluvieux exceptionnels serait donc plus probable. Cette évolution dans le régime des précipitations est susceptible d'influer sur le phénomène de « battement des nappes », c'est-à-dire la variation du niveau des nappes d'eaux souterraines. Les zones soumises à des battements de nappes (assèchement ou humidification) sont des contextes défavorables à la stabilité des massifs rocheux : la perturbation des conditions hydriques (ennoyage ou dénoyage des carrières) peut s'avérer, dans certaines circonstances, un facteur aggravant qui augmente les probabilités de rupture à court terme.

1.3.3. Facteurs anthropiques

L'activité humaine peut engendrer des contraintes et des vibrations dans le sol, accélérant la dégradation des conditions de stabilité de la carrière souterraine (Pédini 2013). Si les secteurs situés au-dessus des carrières souterraines, sont occupés par de l'activité humaine, cela peut :

- créer des fuites d'eau au niveau des réseaux humides des propriétés alentours et engendrer des zones d'infiltrations préférentielles dans le recouvrement de carrière ;
- créer des surcharges sur les piliers et le toit des carrières souterraines sous-jacentes. En effet, avec les constructions et les aménagements en surface, les contraintes verticales dans les piliers augmentent ;
- créer des vibrations engendrées par la circulation des véhicules et des poids lourds.
- la circulation des eaux superficielles ou souterraines peut aussi être modifiée suite aux déboisements.

1.4. Aléas liés à l'existence des carrières souterraines abandonnées

Le creusement de carrières perturbe inéluctablement et de façon définitive les conditions régnant préalablement au sein du massif. En fonction de leur géométrie, de leur profondeur, de la nature des terrains encaissants et du recouvrement, de leur âge et de leur entretien, les carrières peuvent être plus ou moins propices au développement de désordres en surface (Toulemont et Potherat 2002, Tritsch et al. 2004). Ces instabilités sont très souvent classées en trois grandes catégories fonction de l'ampleur ou de la brutalité du mouvement : les affaissements, les effondrements localisés (ou fontis) et les effondrements généralisés. Ces phénomènes, souvent dommageables d'autant plus lorsqu'ils se produisent en zone habitée, peuvent également causer des victimes.

1.4.1. Affaissements

Un affaissement se manifeste par un réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement des carrières souterraines. Ces désordres sont généralement lents, progressifs et « souples », se traduisant par une dépression en forme de cuvette, généralement à fond plat, et sur des terrains plutôt élastiques qui vont supporter la déformation sans rompre (Figure 1.6). On rencontre des affaissements dans les zones de carrières exploitées par hagues et bourrages, quand le toit de carrière s'est lentement affaissé pour se poser sur les remblais (Ramadan 2016). Dans les zones des carrières à ciel ouvert, les remblais peu compacts ont pu être fragilisés par des circulations d'eau à l'origine d'excavations qui se dégradent pour conduire à des affaissements en surface. Si des désordres sensibles peuvent affecter le bâti et les infrastructures (notamment les réseaux enterrés) présents dans l'emprise des carrières, les affaissements de surface lorsqu'ils surviennent, représentent rarement un danger pour les individus en raison de leur évolution progressive et lente (Bérenger et al. 2014).



Figure 1.6 Affaissement à l’aplomb d’une carrière souterraine à Meigné (49) (Bérenger et al. 2014)

1.4.2. Effondrements localisés

Ils sont essentiellement liés aux exploitations partielles proches de la surface, qu’il s’agisse d’exploitations par chambres et piliers ou par galeries filantes, de puits (c’est le cas des marnières ou des catiches), des descenderies ou des galeries isolées à faible profondeur. Un effondrement localisé se caractérise par l’apparition en surface d’un cratère d’effondrement dont l’extension horizontale varie de quelques mètres à des dizaines de mètres de diamètre (Bérenger et al., 2014). Le processus se développe alors verticalement et conduit à la formation d’une cloche de fontis (Figure 1.7). Les vides peuvent remonter vers la surface après affaissement des terrains qui les recouvrent et provoquer une cavité, sous forme de cratère, appelée fontis. Le diamètre et la profondeur des fontis dépendent notamment du volume et de la géométrie de la cavité initiale, de l’épaisseur et de la qualité des terrains de recouvrement (Bérenger 2017).



Figure 1.7 Fontis à Gagny en 1974 (Seine-Saint-Denis) (Pomerol 1988)

1.4.3. Effondrements généralisés

Ils se traduisent par l'effondrement brutal de la carrière et de ses terrains de recouvrement (Figure 1.8). Ce sont très souvent des événements rares mais dont les conséquences sont particulièrement graves. Ils s'accompagnent des secousses vibratoires du sol et produisent un effet de souffle susceptible de projeter sur de grandes distances des matériaux et de mettre en péril les personnes et provoquer des dégâts considérables sur les constructions se trouvant à proximité (Ramadan 2016).



Figure 1.8 Effondrement généralisée à l'aplomb d'une carrière de craie (Indre-et-Loire) (Ramadan 2016)

1.5. Impact de l'eau sur les carrières souterraines abandonnées

L'eau peut jouer un rôle souvent déterminant dans la dégradation de la stabilité à long terme des carrières souterraines abandonnées. Cette dégradation affecte aussi bien les piliers résiduels que les terrains de recouvrement.

1.5.1. Effet de l'eau sur la résistance mécanique de la roche

L'eau circule au sein de la matrice rocheuse au travers d'un réseau de pores interconnectés ou au travers de discontinuités (joints, fractures, failles). En pénétrant dans les carrières souterraines, elle peut agir comme un agent altérant la résistance mécanique de la roche. En fonction de la porosité du matériau, la variation de la teneur en eau a une influence sur la résistance mécanique (Morlier 1970, Jeong et al. 2008). L'hydratation des roches sensibles à l'eau (craie, marne, argile), à comportement élastoplastique, par immersion ou remontées capillaires dans les piliers, provoque une altération des propriétés mécaniques en fonction du degré de saturation de la roche (Figure 1.9). Les processus de dissolution provoqués par l'eau influencent la cohésion interne du matériau, entraînant une réduction de sa résistance à la compression (Didier et al. 2010).

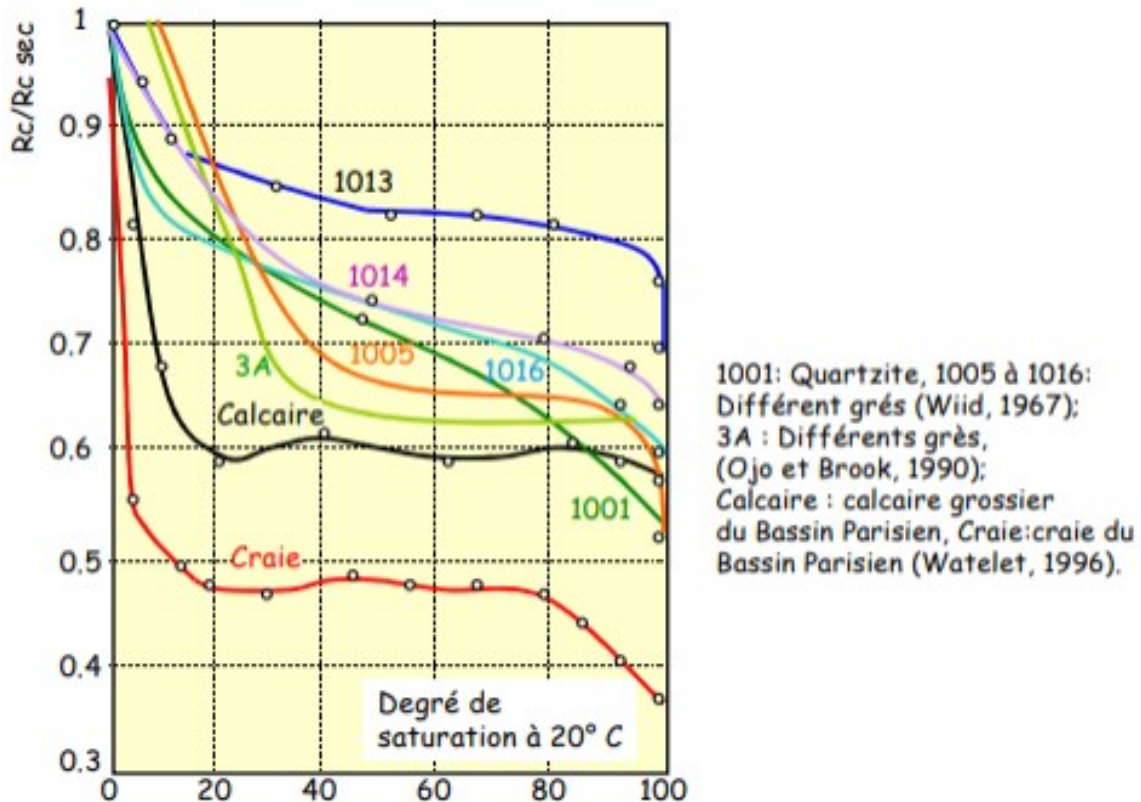


Figure 1.9 Résistance à la compression uniaxiale en fonction du degré de saturation (Watelet 1996)

Les cycles d'humidification et de séchage induits par la présence d'eau peuvent exercer des contraintes poromécaniques et mécaniques sur la roche. Ces cycles entraînent des expansions et des contractions, contribuant ainsi à la formation de fissures favorisant la circulation du fluide et la fragilisation de la matrice rocheuse. Ces phénomènes augmentent la vulnérabilité de la roche à la détérioration, compromettant sa stabilité structurelle. Les mécanismes de mise en charge hydraulique des terrains de couverture (par élévation de la charge hydraulique à la suite d'une forte pluviométrie par exemple) sont également considérés comme possible facteur déclenchant d'effondrements généralisés (Paquette 1997).

1.5.2. Effet de l'eau sur les discontinuités

Les discontinuités naturelles dans la roche, telles que les fissures et les joints, sont susceptibles d'être affectées par la présence d'eau. L'eau agit comme un agent de propagation des fissures en augmentant la pression interne dans ces discontinuités et une diminution des contraintes effectives (normales). L'action lubrifiante de l'eau sur les joints de stratification et plans de fissuration contribue à l'abaissement du coefficient de frottement des discontinuités et la résistance des épontes, par la suite celle de ces discontinuités et dans une moindre mesure la résistance du massif rocheux (Didier et al. 2010). Ce processus peut accélérer l'effritement et la désagrégation de la roche, affaiblissant ainsi les parois des carrières et augmentant le risque de chutes de matériaux. Les effets possibles en termes d'ouverture ou de fermeture des discontinuités peuvent dès lors avoir des effets directs sur la stabilité (notamment ruptures en traction) ou la dégradation (propagation de fractures préexistantes) du massif.

1.5.3. Etude de cas : l'effondrement de la carrière Beaulieu à Château-Landon en 1910

Le retour d'expérience de cet effondrement a mis en évidence l'effet de l'eau et notamment de variation de régime hydrogéologique sur la stabilité des carrières souterraines de craie.

Dans la commune de Château-Landon en Seine-et-Marne (77), quatre carrières souterraines de craie se sont effondrées en 1897, en 1878 et 1910 : il s'agit respectivement des carrières Rathier, Bourdin, Charluchet et Beaulieu. Toutefois l'effondrement de la carrière Beaulieu survenu le 21 janvier 1910 est le seul qui ait été documenté (Gombert et Cherkaoui 2011). Un écroulement soudain et le glissement qui s'en est suivi a entraîné plusieurs habitations implantées le long du canal du Loing et provoqué la mort par ensevelissement de 7 personnes. Le volume de matériaux mis brusquement en mouvement est estimé à 100 000 m³.

L'effondrement s'étend sur un linéaire d'une centaine de mètres et la surface d'arrachement, haute d'une vingtaine de mètres, se situe à une quarantaine de mètres en retrait de l'entrée de la carrière, le long d'une faille traversante (Conil et al. 2023) (Figure 1.10).

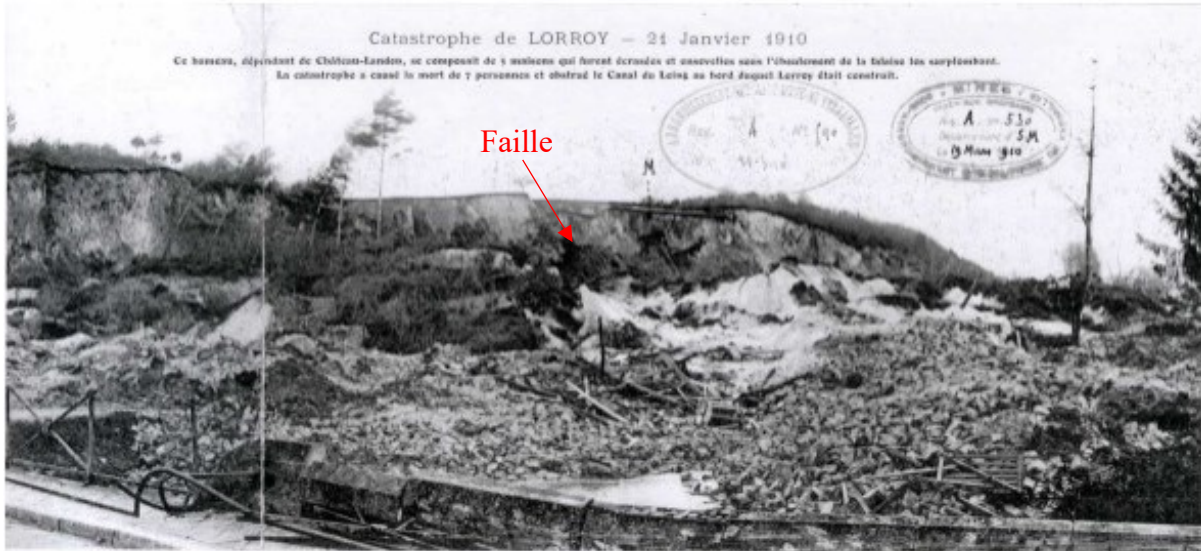


Figure 1.10 Vue de l'effondrement de la carrière Beaulieu le long de la faille traversante (source Archives DRIEE IdF)

Le retour d'expérience réalisé par Gombert et Cherkaoui (2011) a permis de proposer le déroulement suivant de la catastrophe (Figure 1.11) :

- Après 48 mm de précipitations tombées en 10 jours sur un sol rendu imperméable par le gel, un important épisode pluvieux de 27 mm se produit le 19 janvier 1910 ;
- Le Loing entre alors en forte crue le lendemain avec un pic à 3,90 m à l'échelle de Nemours, soit une rapide montée des eaux d'environ 1,8 m d'amplitude ; le Fusain et le Betz, ses affluents locaux, entrent également en crue, ce qui participe à l'inondation de la plaine alluviale située au pied du hameau de Lorroy ; cependant des témoignages indiquent que l'eau de crue s'arrête au bord de la route et ne pénètre pas dans les galeries souterraines de la carrière (Liénard 1910) ;
- La nappe alluviale, en connexion hydraulique directe avec les cours d'eau, remonte alors rapidement de quelques mètres ;
- Cela crée un phénomène de barrage hydraulique qui bloque l'écoulement de la nappe de la craie vers la vallée et induit une remontée de plusieurs mètres de son niveau piézométrique, ce qui provoque l'inondation des parties basses des anciens quartiers de la carrière ; le témoignage du champignoniste qui les exploitait signale que, le

matin de la catastrophe, il a vu les galeries nord inondées sous 0,20 à 0,40 m d'eau, laquelle remontait des puits implantés dans la carrière (Kreziak et Watelet 2016) ; ces puits (appelés « fontaines ») étant profonds de 2 m, cela implique une remontée du niveau de la nappe du même ordre ;

- Le 21 janvier 1910 à 13h10, survient la catastrophe dont l'origine est attribuée à l'effondrement en masse de la partie nord de la carrière ; l'inondation aurait provoqué la rupture des piliers de la zone dite à « petits piliers », située au nord, puis du reste de la cavité ; l'écroulement de ces terrains aurait alors déclenché un glissement de terrain concomitant jusqu'à une grande fracture située à environ 40 m en retrait ;
- Le suivi de petites crues entre 2010 et 2013 dans un piézomètre implanté au droit de l'ancienne carrière Beaulieu a montré que la nappe de la craie réagit de manière quasi synchrone aux variations de hauteur du Loing, avec une amplitude systématiquement supérieure de 10 à 85% à celle de la crue du Loing. Cette analyse confirme les observations transmises lors de l'effondrement de 1910.

Dans ce contexte, il semble que les deux facteurs importants qui ont conduit à l'effondrement de la carrière Beaulieu en 1910 sont la montée de la nappe provoquant une saturation des piliers et une diminution brutale de leurs caractéristiques mécaniques.

De plus, les analyses réalisées par l'Ineris sur les conditions hydroclimatiques lors des effondrements des trois autres carrières (Rathier, Bourdin, Charluchet) à Château-Landon montrent qu'ils ont systématiquement été également précédés par un évènements pluvieux importants.

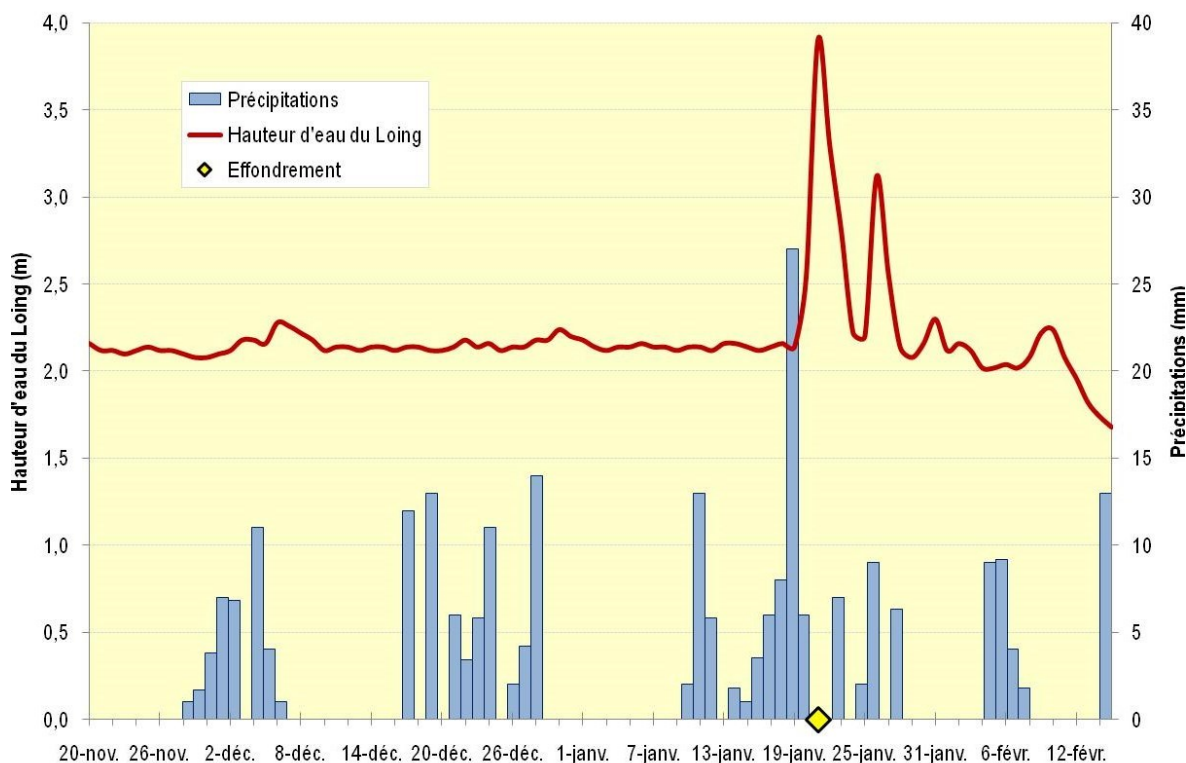


Figure 1.11 Pluviométrie et hydrologie journalière à Nemours au cours des deux mois précédant l'effondrement du 21/01/1910 (Conil et al. 2023)

1.6. Carrière Royer

1.6.1. Description du site

La carrière Royer est elle aussi située dans la commune de Château-Landon (80 km au sud-est de Paris), à 500 m au nord de la carrière Beaulieu effondrée précédemment présentée et à environ 500 m au sud des carrières de craie Rathier et Bourdin effondrées (Figure 1.12). Elle est située à flanc de coteau (70 m NGF) sur la rive gauche de la rivière du Loing. Cette carrière a été exploitée au 19^e siècle pour extraire la craie. Broyée, purifiée et moulée en pains, cette craie permettait de fournir du Blanc d'Espagne, matière première destinée à la fabrication de peintures et de mastics (Conil et al. 2023). En 2006, elle a été intégrée au réseau Natura 2000 pour l'hibernation des chiroptères (chauves-souris).

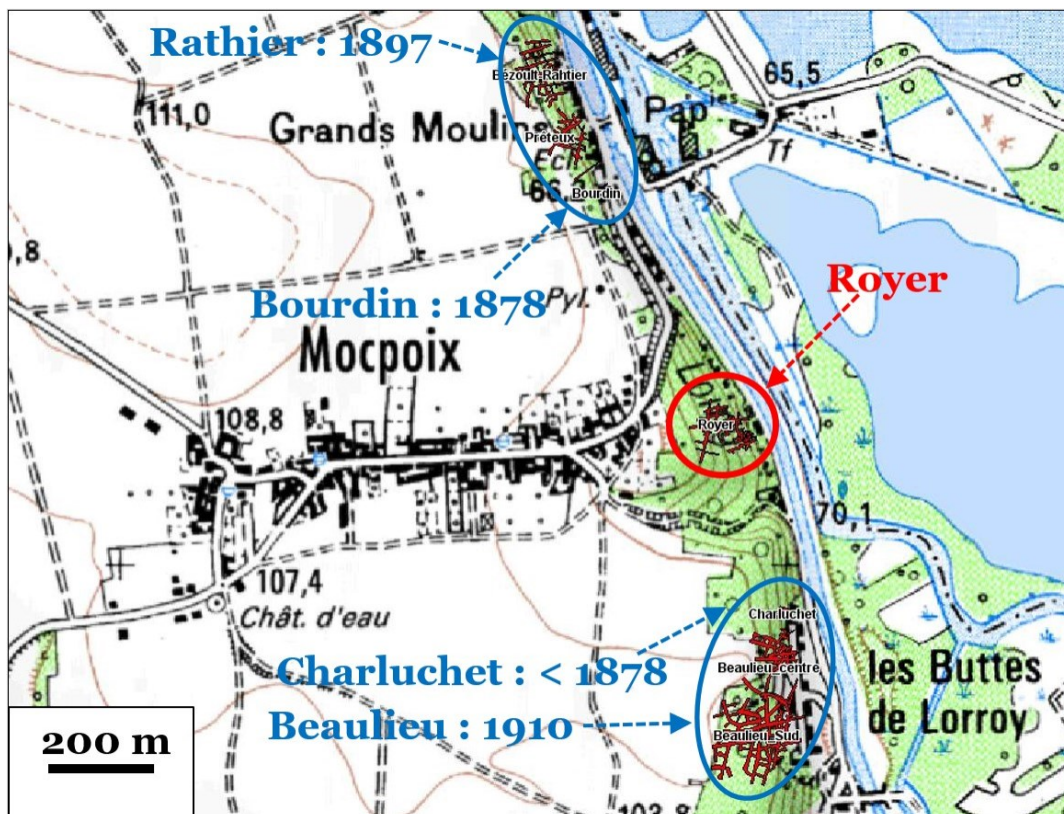
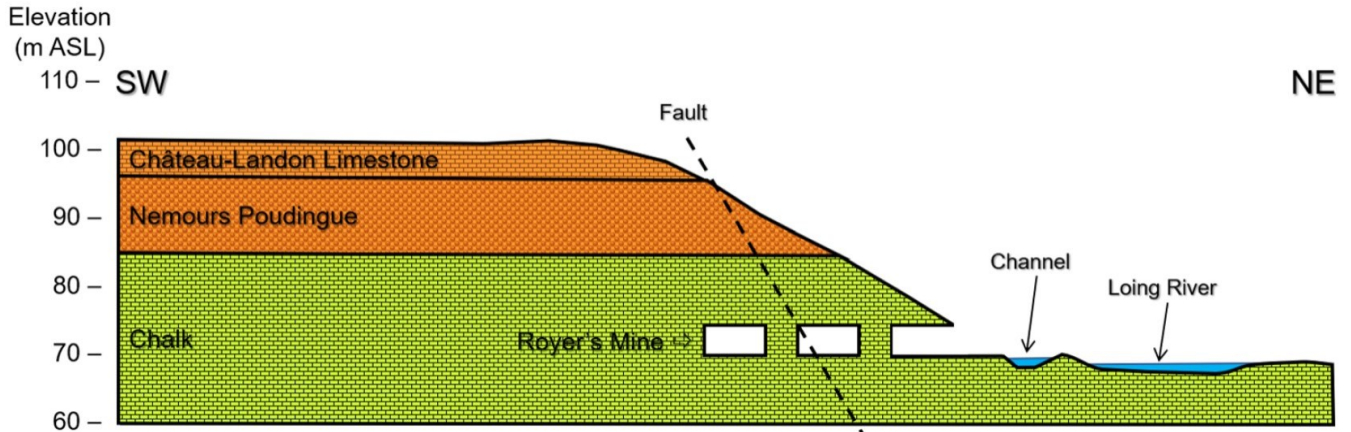


Figure 1.12 Localisation des carrières de craies de craie abandonnées à Château-Landon : carrières effondrées (bleu) et la carrière Royer (rouge) (Pajiep et al. 2024)

D'après la notice de la carte géologique au 1/50 000 n°329 de Château-Landon (XXIV-18), les terrains surplombant la carrière Royer creusée dans la craie campanienne présentés à la figure 1.13 sont composés de quelques mètres d'argiles à silex (RS) puis des terrains du Tertiaire qui sont, de bas en haut :

- les Poudingues à Chailles ou Poudingues de Nemours (e7p) du Priabonien, d'une épaisseur maximale de 15 m, constitués d'un conglomérat de galets de dimension et d'origine diverses (silex de la craie et chailles jurassiques) à matrice argileuse maigre non plastique ; cette formation se retrouve dans le remplissage des chenaux paléokarstiques de la craie, notamment dans la carrière Royer ;
- le calcaire de Château-Landon du Ludien supérieur (g1), épais de 12 à 15 m, formé de gros bancs de calcaire blanchâtre à gris localement marneux, séparés par des lits marneux à argileux verdâtres ;
- un niveau de sables du Stampien moyen (g2b) présents sur une épaisseur réduite au nord de Château-Landon ;

- le calcaire du Gâtinais du Stampien supérieur (g_{2c}), épais de 12 à 15 m, qui forme l'ossature des plateaux en rive gauche du Loing, à une certaine distance de la carrière; il s'agit d'un calcaire lacustre, entrecoupé de niveaux marneux.



La carrière Royer a été exploitée selon la méthode par chambres et piliers. Elle possède deux entrées, distantes de 35 m l'une de l'autre, situées à la base d'un coteau de 25 m de hauteur. Elle se compose de deux galeries principales d'environ 10 m² de section qui s'enfoncent perpendiculairement à la falaise sur 80 m à partir de l'entrée A (zone A) et sur 60 m à partir de l'entrée C (zone C) (Figure 1.14). Ces deux galeries se ramifient ensuite et sont notamment reliées entre elles, vers le fond de la carrière, par deux galeries transversales d'une longueur totale d'environ 100 m. Des petits piliers sont laissés en bordure de coteau (2,5 à 3,5 m de côté) et de larges galeries en profondeur (4 à 5 m de large). De manière générale, elle possède un faible taux de défrètement (inférieur à 45%) hormis une zone au nord qui a un taux de défrètement d'environ 75%. Sans considérer les dégradations mécaniques, le point critique de la carrière sur le plan géométrique se situe au niveau de cette zone, à fort taux de défrètement, correspondant à la zone la plus sollicitée (Conil et al. 2023).

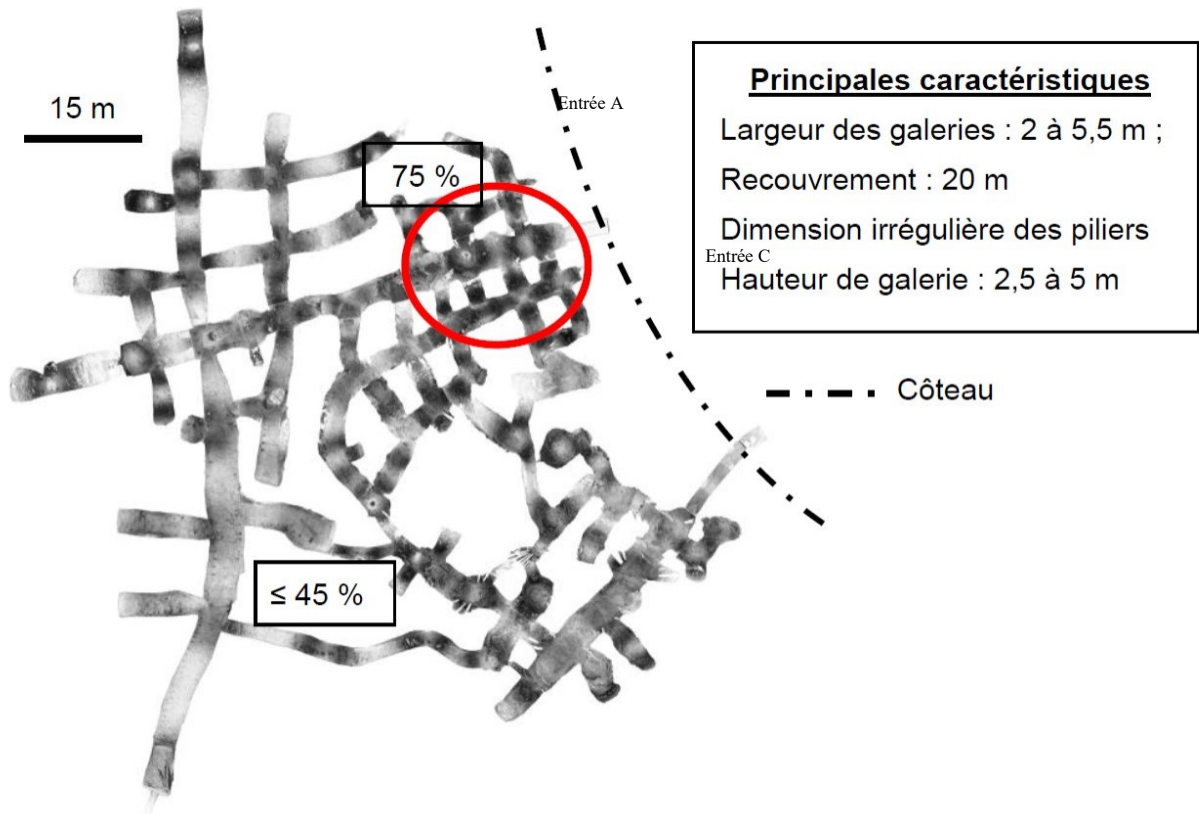


Figure 1.14 Scan 3D de la carrière Royer (Renaud et al. 2019)

1.6.2. Contexte général de l'étude

En 2015 des inspections visuelles et des relevés de dégradation ont été effectués dans la carrière Royer afin d'appréhender au mieux l'état de la carrière et son évolution. Plusieurs désordres liés au vieillissement de la carrière ont été constaté parmi lesquels des fissures mécaniques, des chutes de blocs, la fracturation des parements et bords de piliers.

En juin 2016, à la suite d'un évènement hydroclimatique extrême qui a engendré une crue du Loing du même type que la crue centennale de 1910 et alors qu'il n'avait pas été visuellement constaté auparavant de désordre significatif de l'ouvrage, plusieurs désordres ont été observés à savoir : des écaillages sur les parements, un éboulement le long de la grande faille identifiée (Al Heib et al. 2023) (Figure 1.10) ainsi que des mouvements du remblai près de l'entrée (Figure 1.15) attestant alors du caractère actif des dégradations.



Figure 1.15 Vue des désordres constatés après l'évènement hydroclimatique extrême de juin 2016, affectant une faille (à gauche) et tassant les maçonneries par remobilisation des remblais à la base des galeries (à droite) (Conil 2024)

Par la suite, Gombert et Cherkaoui (2011) ont réalisé une comparaison des carrières Beaulieu (effondrée en 1910) et Royer (non effondrée) qui s'est avérée pertinente car elle a permis de souligner de nombreuses similitudes :

- Du point de vue de leur géométrie, les deux carrières ont des entrées situées à la base d'un coteau d'une hauteur comprise entre 25 m et 40 m, leur schéma d'exploitation est irrégulier avec une ou plusieurs zones présentant un taux de défrètement élevé alors que l'ensemble de la carrière a un taux de défrètement plutôt faible ;
- Du point du vue géologique et géomécanique, il s'agit de la même craie dont on sait qu'elle subit une forte diminution de sa résistance au contact de l'eau ;
- En termes de dégradations observées, il est possible que le couloir de fracturation situé à 40 m en retrait du front du versant soit similaire sur les deux carrières ; il correspondrait à la zone d'arrachement sur le site de la carrière Beaulieu et aux grandes fractures repérées à la même distance du versant dans la carrière Royer.

Cependant deux différences entre les deux carrières existent notamment :

- La carrière Beaulieu est positionnée à proximité de la confluence de deux cours d'eau, le Loing et le Fusain, et donc à l'intersection de deux vallées (Figure 1.16). Cette configuration laisse supposer que les terrains ont été soumis à des contraintes mécaniques provenant de ces vallées, ce qui pourrait avoir rendu ces terrains plus perméables à l'eau via des fractures résultantes de ces contraintes induites par les vallées ;
- Les documents d'archives de l'époque ont indiqué que la carrière Beaulieu avait d'abord été exploitée à ciel ouvert puis en souterrain, une différence avec la carrière Royer qui n'avait pas subi cette étape. On peut envisager, bien que sans certitude, que cette phase initiale ait potentiellement altéré l'état de contrainte dans le terrain.

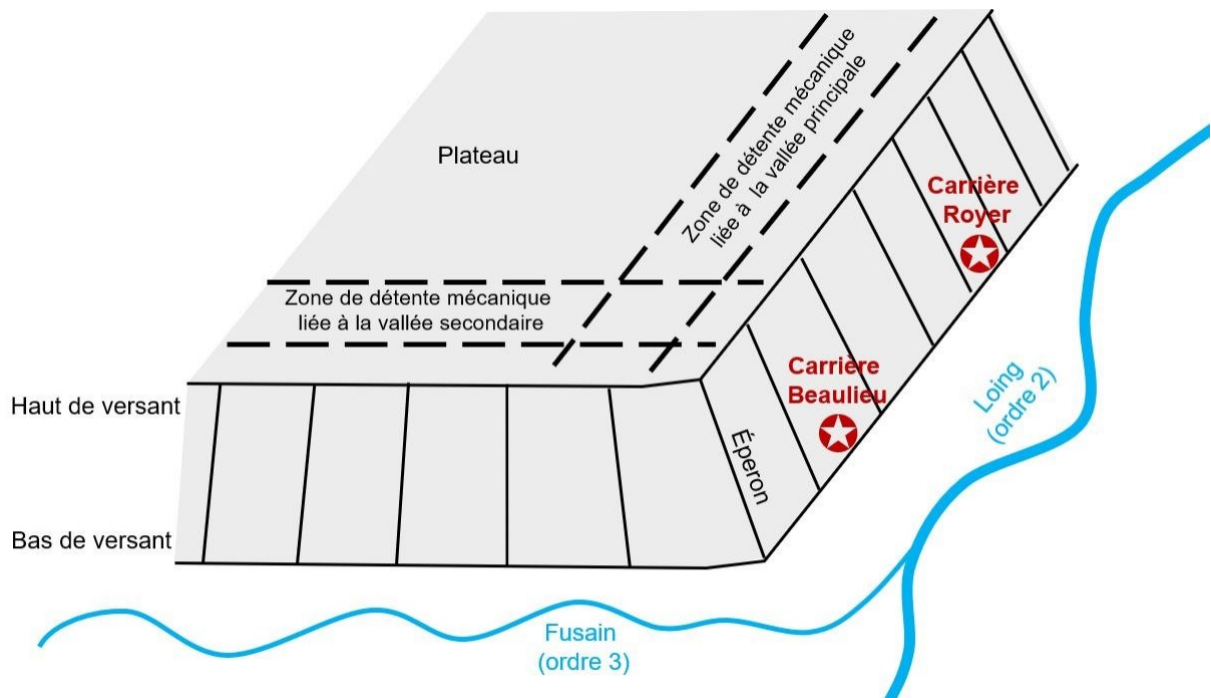


Figure 1.16 Localisation schématique des cours d'eau autour des carrières Beaulieu et Royer (Conil 2024)

Enfin on peut ajouter qu'en 1910, une montée en crue du Loing de 2 m a suffi à ennoyer la carrière Beaulieu alors que cela doit correspondre à environ 2 m sous le plancher de la carrière Royer. Il est donc possible que la première carrière ait été plus basse d'environ 2 m, et donc plus facilement ennoyée.

À la suite des dommages constatés dans la carrière Royer lors de l'événement hydroclimatique de juin 2016, similaire à la crue de janvier 1910, une décision a été prise d'instrumenter cette carrière sur le long terme (Figure 1.17). L'objectif principal est d'observer l'évolution du site, particulièrement en cas de survenue de nouveaux phénomènes hydroclimatiques extrêmes tels que fortes précipitations, crues majeures ou sécheresses intenses mais aussi d'étudier les interactions eau-roche permettant ainsi de comprendre son fonctionnement hydrogéologique et de quantifier les effets des circulations d'eau sur sa stabilité. L'ensemble des données acquises en temps quasi-réel est visualisable sur un portail web (e.cenaris, <https://cenaris.ineris.fr/SYTGEMweb/public/>) facilitant l'accès aux données et leur suivi.

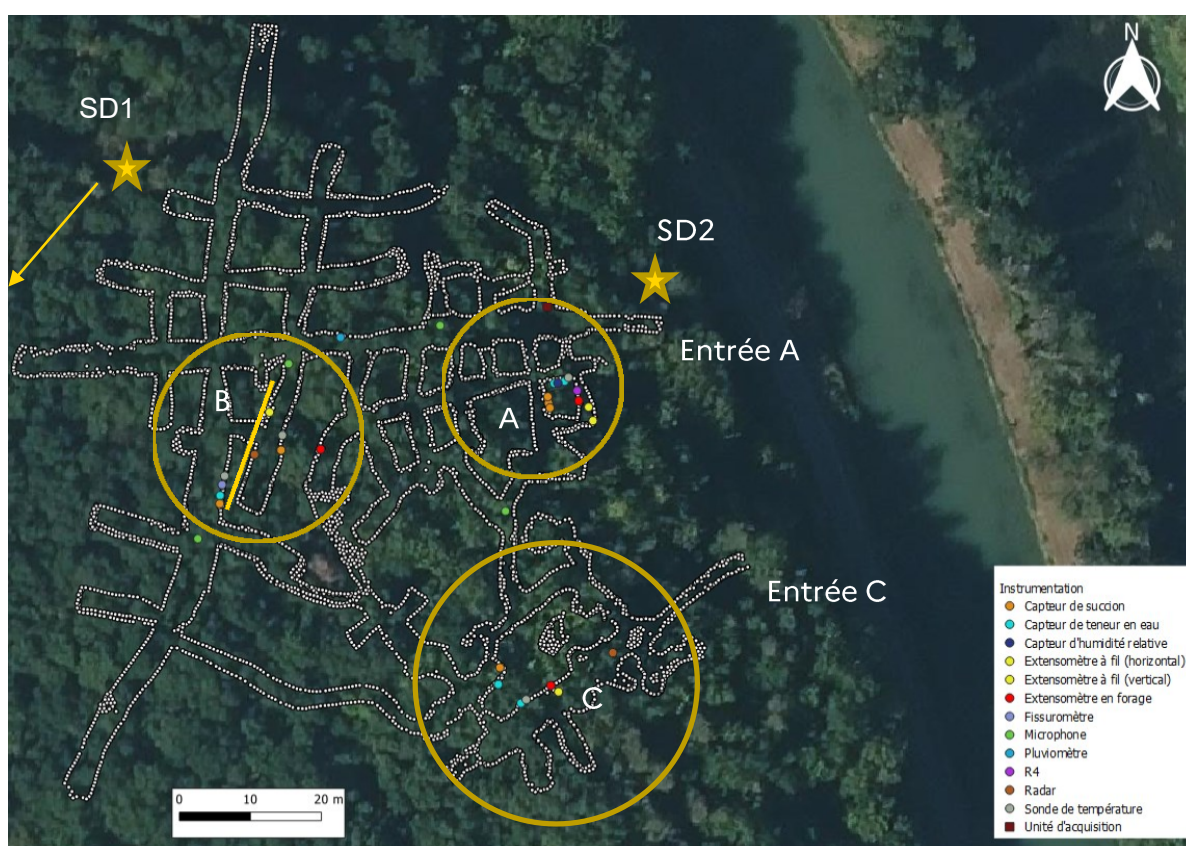


Figure 1.17 Localisation de l'instrumentation mise en place dans la carrière Royer (Conil 2024)

1.6.3. Mesures in-situ dans la carrière Royer

1.6.3.1. Mesure de la température et de l'humidité de l'air

La température dans la carrière varie entre 13°C en été et 9°C en hiver, comme présente la figure 1.18 qui illustre en vert les relevés de température dans la zone B depuis la mise en place des capteurs. En revanche, les mesures d'humidité restent remarquablement constantes, oscillant autour de 100%. Néanmoins les capteurs ne sont pas conçus pour des niveaux d'humidité dépassant les 90% c'est probablement la raison pour laquelle les valeurs varient peu (Conil et al 2023). Ainsi, les valeurs mesurées, indiquent simplement que l'air ambiant demeure très humide, quel que soit la période de l'année.

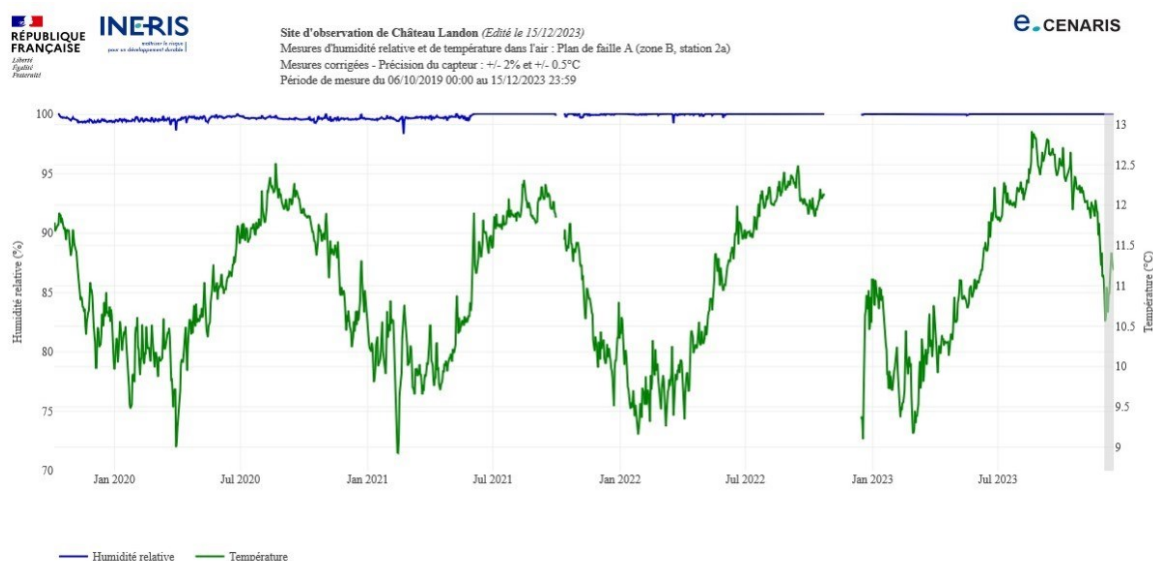


Figure 1.18 Mesures d'humidité relative (bleu) et de température (vert) dans la carrière Royer (Conil 2024)

1.6.3.2. Mesure de la teneur en eau volumique dans les piliers de craie

Des capteurs de teneur en eau volumique ont été installés à des profondeurs variant entre 5 cm et 50 cm dans les différentes zones instrumentées de la carrière (zone A, B et C). La figure 1.19 présente les valeurs mesurées entre 2019 et 2023.

Les relevés in situ indiquent que la saturation de la craie varie selon les zones : de 50% à une profondeur de 5 cm dans la zone B – 2b (avec une teneur en eau volumique de 22%) jusqu'à 98% dans la zone A à une profondeur de 50 cm (avec une teneur en eau volumique de 44%). Les valeurs les plus élevées sont observées dans les zones A et C, tandis que dans la zone B, les valeurs sont généralement plus basses. Dans toutes les zones, les valeurs les plus faibles sont enregistrées en surface et augmentent avec la profondeur (Conil 2024).

Il est à noter qu'en mai 2021, les capteurs de la zone A, installés respectivement à 20 et 50 cm, ont été repositionnés pour assurer un meilleur contact entre le dispositif de mesure et le massif rocheux, garantissant ainsi des mesures plus fiables. Cette modification a entraîné une augmentation significative des teneurs en eau mesurées, conformément à ce qui était attendu. Dans l'ensemble, il semble que ces valeurs soient influencées par les variations climatiques, ce qui se traduit par des courbes plus ou moins sinusoïdales.

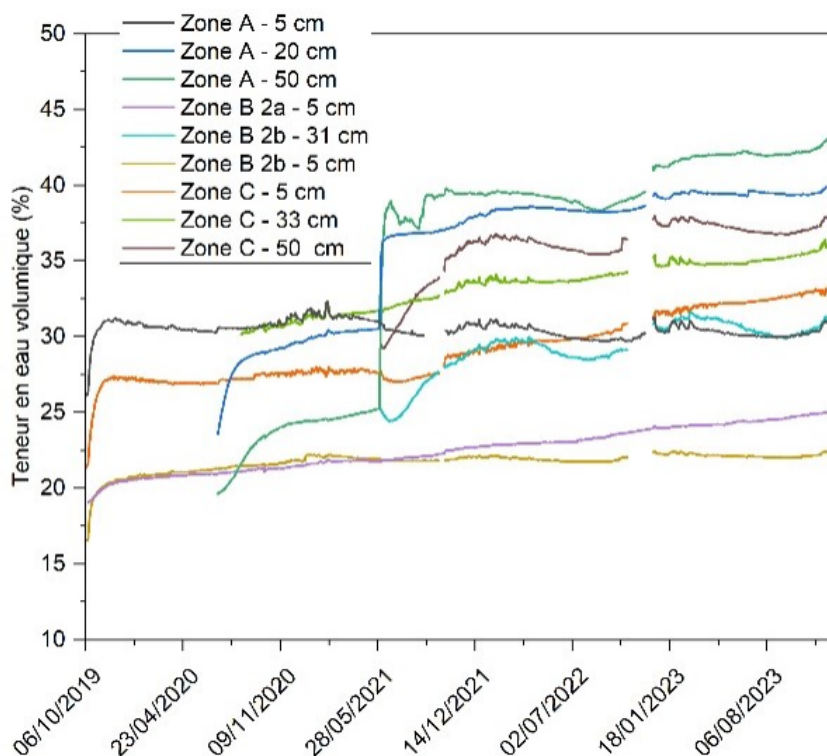


Figure 1.19 Mesures des teneurs en eau volumique dans la carrière Royer en fonction des zones (Conil 2024)

1.6.3.3. Mesures piézométriques

La figure 1.20 présente les niveaux d'eau mesurés à l'aide des piézomètres installés sur le plateau (SD1) et en aval de la carrière (SD2) entre 2019 et 2023 ainsi que dans le Loing. Les résultats indiquent que malgré des conditions climatiques ordinaires en termes de précipitations, les variations observées au cours de l'année 2021 ont influencé le niveau de la nappe de la craie.

Sur le plateau (piézomètre SD), le niveau piézométrique moyen de la nappe de la craie s'établit à 70 mètres NGF. Les périodes de basses eaux surviennent en novembre-décembre, avec des niveaux inférieurs à 67,4 m NGF, suivies rapidement par une recharge dépassant les 72,6 m

NGF, atteignant un pic en février-mars. Ainsi, le battement annuel de la nappe de la craie est d'environ 5,2 mètres. En aval de la carrière (piézomètre SD2), sous l'influence plus directe du Loing, on observe une stabilité prolongée du niveau de la nappe autour de 66 m NGF, ponctuée de quelques pics liés à des épisodes pluvieux ou hydrologiques plus intenses. Les crues sont brèves et se manifestent également en février-mars, avec des niveaux supérieurs à 67,3 m NGF. À cet endroit, le niveau piézométrique moyen de la nappe de la craie est à 66,7 m NGF, avec une variation annuelle modérée tamponnée par la nappe alluviale du Loing, ne dépassant pas 1,3 mètre (Conil 2024).

Le canal du Loing quant à lui longe le pied du relief où se trouve la carrière souterraine, étant situé à environ 2 mètres au-dessus de cette dernière. Cependant, son influence hydrogéologique semble limitée à proximité de la carrière, probablement en raison de son étanchéité. Néanmoins, il agit comme un obstacle pour la nappe de la craie, l'obligeant à s'infiltrer en dessous pour rejoindre la nappe alluviale du Loing. Afin de mieux appréhender l'impact des fluctuations du niveau du Loing sur celui de la nappe, un limnimètre a été installé directement dans le Loing fin 2021 pour surveiller son niveau. Ceci a confirmé que la nappe de la craie est directement liée au Loing au niveau de la carrière. En 2022 et 2023, les variations du niveau de la nappe de la craie sont moins prononcées en raison des longues périodes de sécheresse.

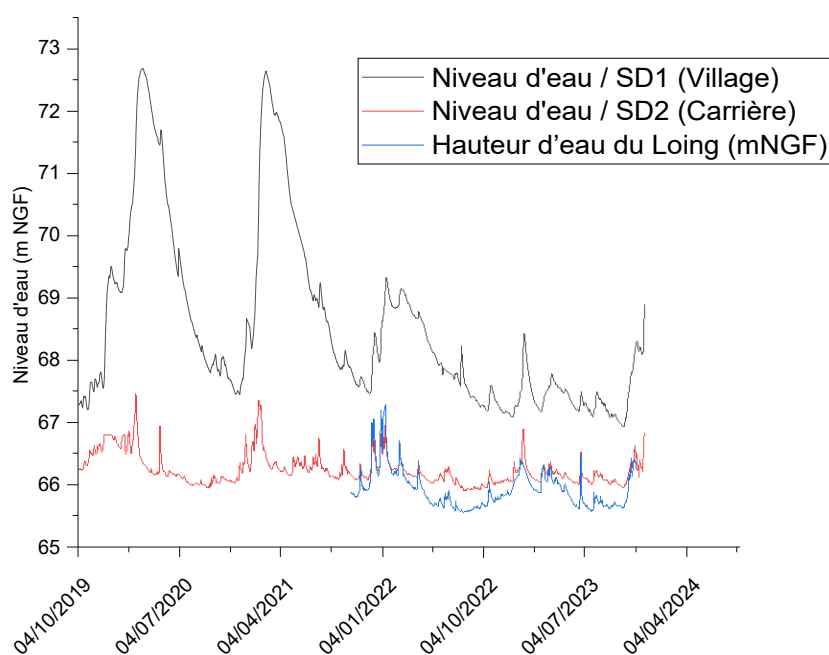


Figure 1.20 Niveau d'eau dans les sondages piézométriques ainsi que dans le Loing (Conil 2024)

1.7. Conclusion

Ce premier chapitre a présenté une problématique importante liée à l'existence de carrières souterraines abandonnées en France. Leur diversité et complexité depuis leur exploitation jusqu'à leur abandon ont été mises en évidence.

Les différentes études menées sur la problématique révèlent une série de défis et de risques auxquels ces structures font face, illustrés par les effondrements des carrières de Château-Landon en lien avec les fortes précipitations. La carrière Royer, voisine de la carrière effondrée, a été choisie comme site pilote par l'Ineris et fait l'objet d'une instrumentation complète pour surveiller les paramètres hydromécaniques et hydrogéologiques depuis 2020 (Conil et al. 2023). Les premiers résultats d'observations et mesures in situ dans la carrière Royer montrent que les variations saisonnières dans les galeries de la carrière semblent influencer les mesures. Ils se traduisent par des cycles du niveau d'eau et de la teneur en eau dans les piliers.

L'objectif de cette thèse est d'approfondir nos connaissances sur l'impact de l'eau sur le comportement mécanique à court et long terme de la craie de Château-Landon. Elle vise à comprendre les mécanismes de dégradation et d'instabilité spécifiques à cette roche. Elle s'appuie d'abord sur une approche expérimentale afin de mieux comprendre les interactions « eau-roche » pour ce matériau. La compréhension de ces interactions nous a ensuite amené à formuler un modèle de comportement adapté à ce matériau, puis à le valider sur des chemins d'essais de laboratoire.

Chapitre 2 : Craie – origine, caractérisation et modélisation

Table de matière

2.1.	Introduction.....	32
2.2.	Généralités	32
2.3.	Comportement mécanique de la craie.....	37
2.4.	La craie de Château-Landon.....	46
2.5.	Les modèles de comportement de la craie.....	54
2.6.	Conclusion	61

2.1. Introduction

Après avoir présenté les problématiques liés à l'existence des carrières souterraines abandonnées et le contexte général de notre étude, nous allons nous intéresser dans ce deuxième chapitre au matériau craie.

Ainsi, dans la première partie de ce chapitre, nous parlerons de l'origine et de la structure de la craie à travers une caractérisation minéralogique, chimique et microstructurale. La deuxième partie présentera ses propriétés physiques ainsi que les différents aspects liés à son comportement mécanique en fonction de la nature et le chemin de sollicitation, du fluide saturant mais aussi du temps. Dans la troisième partie, nous nous intéresserons à la craie de Château-Landon en présentant les travaux qui avaient été réalisés avant le démarrage de cette recherche doctorale. Ses caractérisations minéralogique, microstructurale et mécanique seront présentées et discutées. Enfin la quatrième et dernière partie de ce chapitre mettra l'accent sur les modèles de comportement construits au fil des années pour décrire le comportement de ce matériau.

2.2. Généralités

2.2.1. Origine et formation

Par définition, la craie est une roche sédimentaire, d'origine marine, carbonatée, blanche, poreuse, à texture fine qui se distingue des calcaires (Foucault et al. 2014). Cette roche est le résultat de la sédimentation d'innombrables coccolithophoridés¹, des algues unicellulaires marines munies de plaques calcaires, les coccolithes (Figure 2.1). Ces microorganismes produisaient en abondance ces coccolithes, qui, après leur mort, se déposaient sur le fond marin en couches successives. La formation de la craie remonte au Crétacé (une période géologique comprise entre environ 145 et 66 millions d'années), d'où elle tire son nom (appellation « creta » en latin). Ultérieurement, sur base des (macro)fossiles, le Crétacé a été subdivisé en trois étages du plus ancien au plus récent : Cénomaniens, Turonien, Sénonien. Le processus de formation de la craie s'est déroulé dans des environnements marins calmes et peu profonds, où les conditions de vie des coccolithophoridés étaient optimales. Les sédiments fins

¹ Coccolithophoridés : [du grec kokkos, pépin, lithos, pierre et phoros, qui porte] algues unicellulaires pélagiques de petites tailles (environ 0,01 mm) s'entourant d'une enveloppe sphérique (coccosphère) constituée par l'assemblage de plaques calcaires discoïdes (coccolithes). D'après le dictionnaire de géologie de Foucault A. et Raoult J.-F.

et les eaux riches en éléments nutritifs favorisaient la prolifération de ces organismes et la précipitation du carbonate de calcium, principal constituant de la craie.

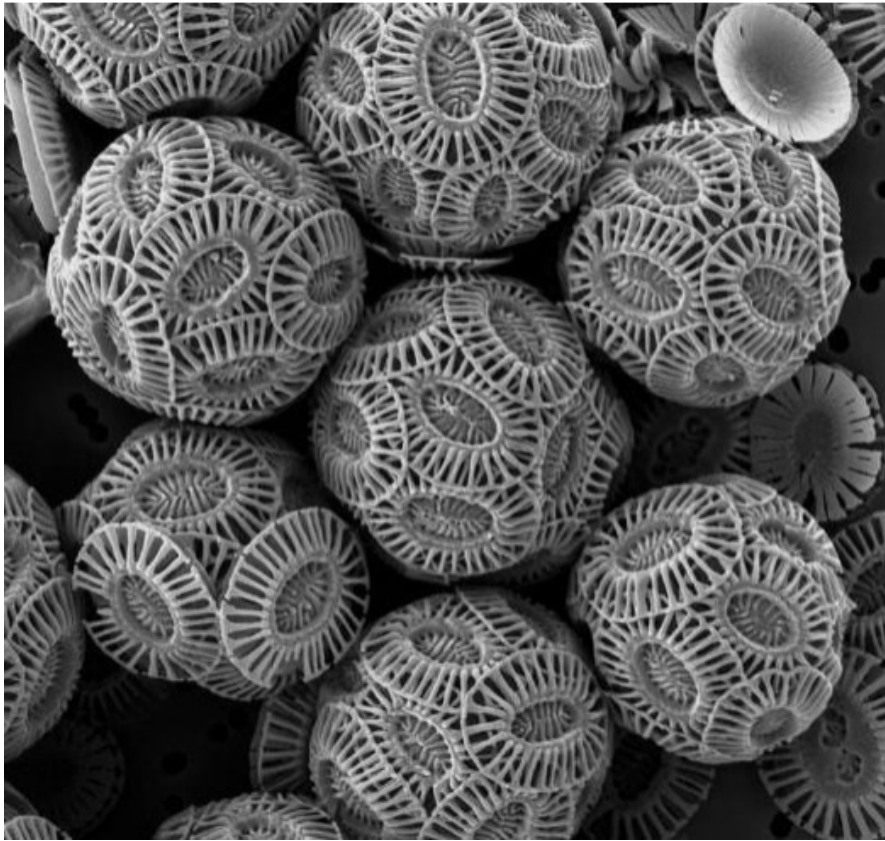


Figure 2.1 Observations au M.E.B des coccolithes (Delebecq 2017)

2.2.2. Composition minéralogique et chimique

L'utilisation du microscope électronique couplé à la diffraction aux rayons X et à la porosimétrie permet une étude complète de la structure microscopique et des caractéristiques minéralogiques de la craie. Ainsi d'un point de vue minéralogique et chimique, la craie est principalement dominée par la calcite, une forme cristalline du carbonate de calcium (CaCO_3). Son pourcentage peut dépasser 90, voire 98 %. Cette calcite provient des coccolithes, dont la décomposition a libéré ces minuscules cristaux calcaires, donnant à la craie sa structure caractéristique et sa couleur blanche. Outre la calcite, la craie peut contenir des minéraux accessoires tels que de la dolomite $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$, du phosphate de calcium $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, de la glauconie (sulfate de fer hydraté), des argiles, de la silice, en proportions variables mais également des microfossiles (principalement des foraminifères) et des fossiles carbonatés ou siliceux tels des oursins, des bélemnites (mollusques céphalopodes). On distingue ainsi deux grandes familles de craie : les craies blanches pures dites typiques composées d'au moins 95%

de CaCO_3 et les craies dites atypiques telles que les craies siliceuses, dolomitiques, phosphatées, ferrières ou glauconieuses, marneuses (argiles) ou des tuffeaux (calcérinites).

Doremus et Henry (1985) ont montré que la fraction argileuse peut modifier le comportement de la craie. Ils proposent une limite à 10% de fraction argileuse pour délimiter les craies blanches des craies argileuses, du fait de propriétés variables et distinctes. On distingue ainsi des craies Turoniennes et Sénoniennes où les minéraux argileux sont peu abondants et repartis de manière aléatoire et des craies Cénomaniennes où les argiles sont plus abondantes oblitérant plus ou moins les pores. Bonvallet (1979) quant à lui a montré que la fraction glauconieuse, lorsqu'elle devient relativement élevée, diminue les caractéristiques mécaniques. Enfin, Mortimore et Fielding (1990) ont montré que des facteurs tels que l'angularité de grains, la forme des grains ou encore l'uniformité de la taille des grains ont une influence importante sur le comportement macroscopique de la craie. Cependant, l'analyse de la composition de la craie ne permet pas de caractériser la craie exhaustivement, car il n'existe pas de relation unique entre la structure et le comportement mécanique (Bell et al. 1990) qui dépend, entre autres, de la cimentation des grains (Clayton 1983), et de la nature du fluide saturant (Schroeder 2002).

2.2.3. Analyse microstructurale au MEB de la craie

La caractérisation microstructurale de la craie est étudiée généralement au moyen de la porosimétrie au mercure et à l'aide de l'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB). La porosimétrie au mercure est largement utilisée pour caractériser le réseau poreux des matériaux grâce à la reconstruction des courbes d'intrusions de mercure.

La microstructure de la craie présente souvent une texture poreuse avec des pores de différentes tailles (Figure 2.2). Masson (1973) a trouvé une gamme de variation de la valeur du rayon d'entrée entre 0,1 et 1 μm pour 13 types de craies françaises (Figure 2.3). Les différences entre les rayons d'accès des pores des craies expliquent la différence de comportement et de caractéristique à l'échelle macroscopique. La répartition granulométrique des pores est très étalée. Elle est composée de « gros » pores de 1 à 5 μm en fonction des craies de formes convexes avec un rayon d'entrée plus petit. Ces pores peuvent être de nature intergranulaire (entre les grains de calcite) ou intra-granulaire (à l'intérieur des grains eux-mêmes). Les grains de calcite sont reliés par adhérence ou coalescence (Tallon 1976). La liaison entre les grains se fait soit par des liaisons faibles ioniques (ou de Van der Waals) facilitées lorsque la surface de contact entre les grains est grande, soit par fusion partielle par

des phénomènes de dissolution/recristallisation autour des zones de contact entre les grains. La cimentation des différents éléments constitutifs de la craie est très faible voire presque inexistante bien que des ponts de calcite aient déjà été observés par Mata (2001) et Hjuler et Fabricius (2009). Du fait de la cimentation entre les grains, les microfissures sont rarement observées dans la craie.

Ces observations mettent en évidence la complexité de la structure de la craie. Le réseau des pores est très interconnecté et les fluides y circulent. Ces interconnexions créent localement des hétérogénéités à l'échelle microscopique mais n'affectent pas cependant l'homogénéité globale de la craie à l'échelle macroscopique (Schroeder 2003). Les éléments constitutifs de la craie ne présentant pas d'orientation préférentielle, la craie est très souvent considérée comme une roche structuralement isotrope. Elle est également considérée comme un matériau granulaire au regard des photographies diverses prises au MEB.

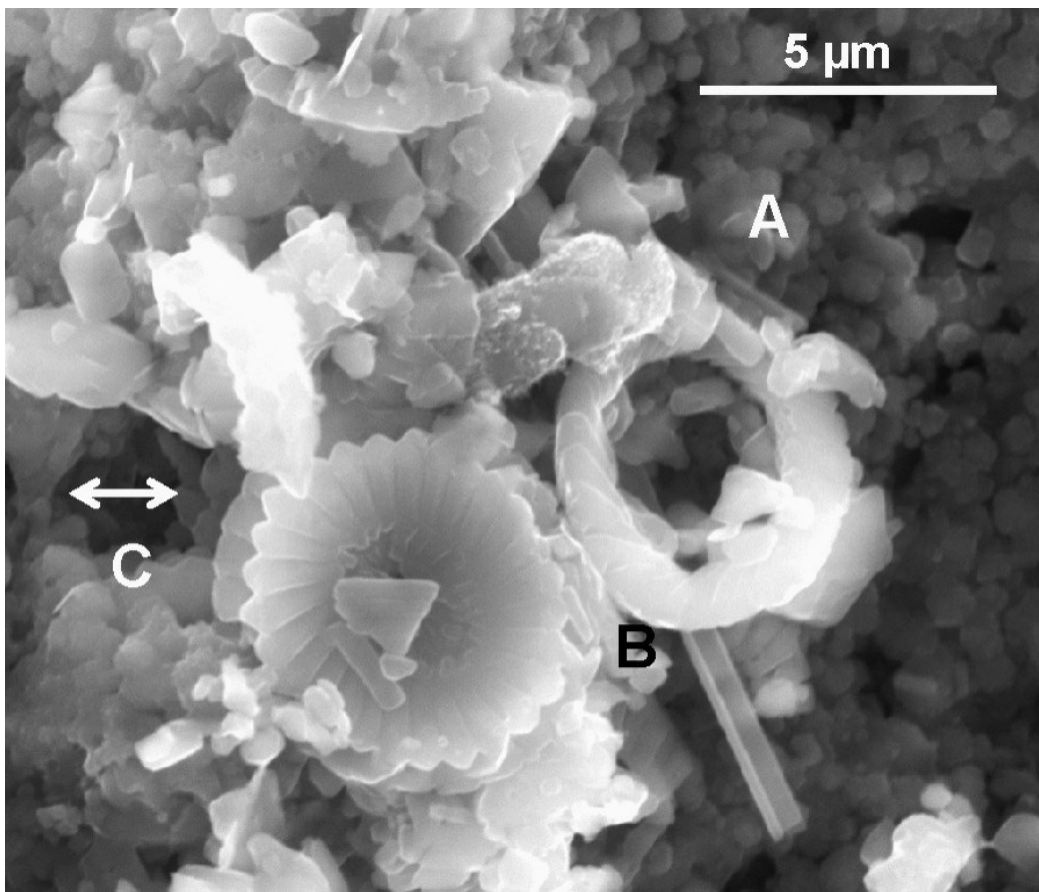


Figure 2.2 Image au MEB de la craie d'Estreux (Sorgi et De Gennaro 2007)

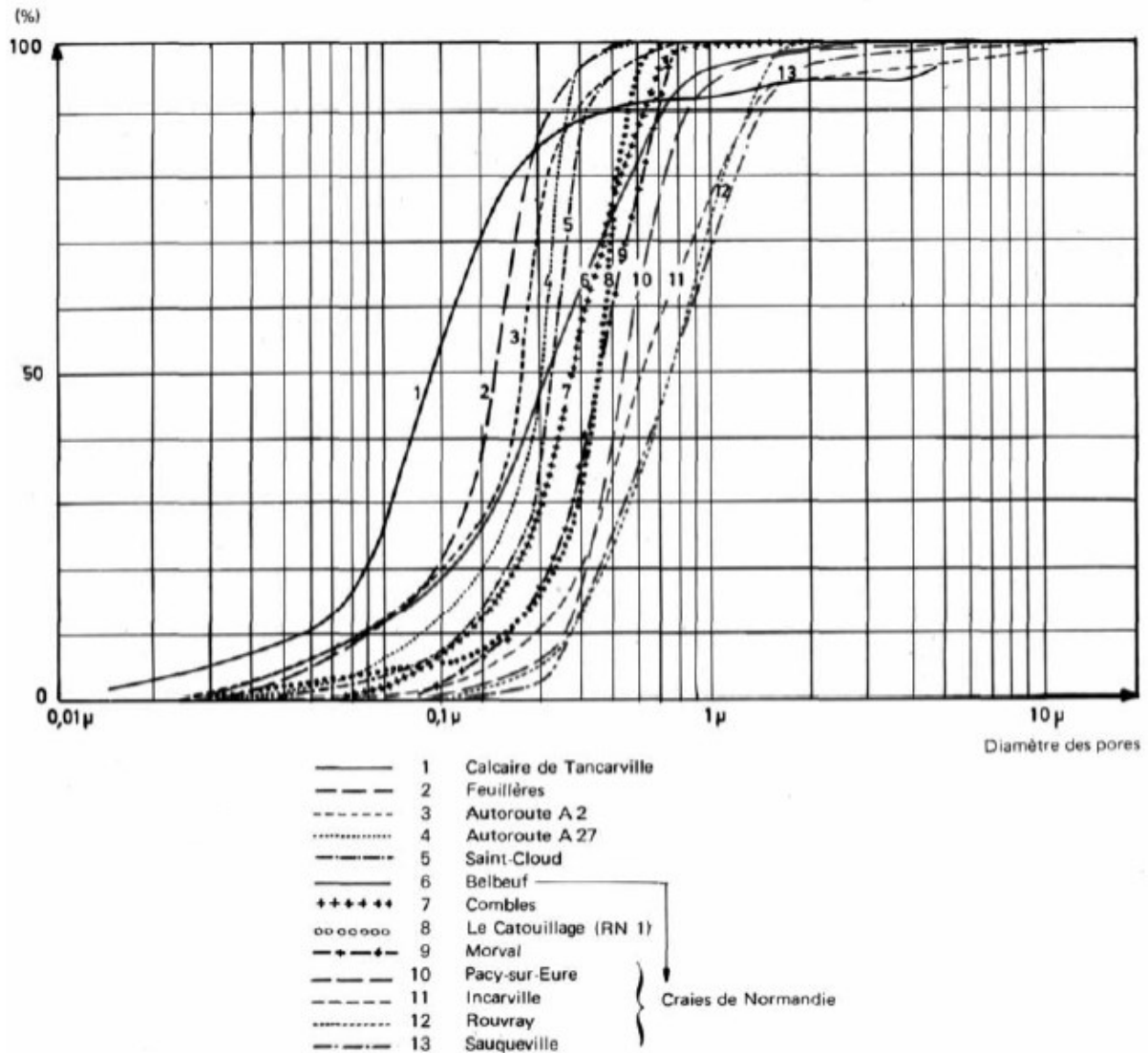


Figure 2.3 Courbes de répartition des pores mesurée sur 13 craies françaises (Masson 1973)

2.2.4. Propriétés physiques

Les craies présentent des valeurs étalées de caractéristiques physiques. Le tableau 2.1 récapitule l'ensemble des propriétés physiques observées dans la littérature pour quelques craies regroupant les craies du Bassin parisien, de Mons et des craies danoises ou encore de l'Irlande. On peut constater que certains paramètres classent la craie parmi les sols mous et d'autres parmi les roches dures. La craie de l'Irlande ayant la plus faible porosité de 9% (Mimran 1978) tandis que la craie de Stevns a une porosité de 47% (Fabricius 2007). On distingue aussi des craies atypiques telles que la craie de Beauval avec 56% de CaCO_3 des craies pures telles que la craie de Précy-Oise avec 100% de CaCO_3 (Hjuler et Fabricius 2009).

Tableau 2.1 Synthèse des propriétés physiques de quelques craies (Lafrance 2016)

Age géologique	Désignation	Teneur en [CaCO ₃] (%)	Porosité (%)	Masse vol. sèche (g. cm ⁻³)	Masse vol. grains (g. cm ⁻³)	Perméabilité (mD)	Surface spécifique (m ² . g ⁻¹)	Référence
Miocène	Craie de Pietra Leccese (Italie)	93	36	-	2,62	6	-	Brignoli et al. 1994
Maastrichtien	Aalborg (Danemark)	94	47	1,44	2,72	4	3,6	Risnes et al. 2003
	Craie de Stevns Klint (Danemark)	99,8	47	1,29	2,76	2	1,7	Fabricius 2007
Campanien	Craie de Lixhe (Belgique)	98	42	1,19	2,71	1	9	De Gennaro et al. 2004
	Craie de Newhaven (France)	-	34	1,78	-	-	-	Duperret et al. 2005
	Craie d'Obourg (Belgique)	94	39	1,66	2,72	2	3,4	Hjuler et Fabricius 2009
	Précy-sur-Oise (France)	100	43	1,53	2,69	7	1,5	Hjuler et Fabricius 2009
Santonien	Craie de Seaford (France)	-	40	1,48	-	-	-	Duperret et al. 2005
	Craie de Hardivilliers (France)	77	46	1,53	2,81	1	3,2	Hjuler et Fabricius 2009
	Craie de Beauval (France)	56	46	1,58	2,91	3	6,9	Hjuler et Fabricius 2009
	Craie de St Marguerite (France)	95.3	46	1,47	2,73	7	2,1	Hjuler et Fabricius 2009
Turonien	Craie de Lewes (France)	-	41	1,59	-	-	-	Duperret et al. 2005
	Craie d'Haubourdin (France)	98	42	1,57	2,77	2	-	Nadah et al. 2013
	Craie d'Estreux (France)	75	37	1,73	2,74	-	14	Nguyen 2009

2.3. Comportement mécanique de la craie

2.3.1. Caractérisation mécanique à court terme

Le comportement mécanique de la craie est assez complexe. Il dépend de nombreux paramètres tels que la porosité, la composition minéralogique (présence d'argiles et de silice), le fluide saturant, les conditions de saturation mais aussi du temps et de la charge appliquée. De multiples mécanismes de déformation et de rupture ont été observés expérimentalement.

2.3.1.1. Comportement sous contrainte hydrostatique

Le comportement sous contrainte hydrostatique est confirmé par plusieurs auteurs sur des craies diverses (Shao 1987, Schroeder 2002, Xie 2005, Priol 2005, Nguyen 2009, Lafrance 2016, Geremia et al. 2021, Kibikas et al. 2023). Il peut généralement se décomposer en trois phases (Figure 2.4). La première correspond à un comportement élastique quasi-linéaire (zone 1), c'est la phase qui traduit un comportement élastique et réversible. Seule la déformation volumique existe et il y a une absence de dégradation apparente de la roche. La seconde phase (zone 2) reflète une forte contractance plastique, on observe un effondrement progressif de la structure poreuse par rupture des ponts entre grains et croissance de la surface entre les grains. La dernière phase (zone 3) est celle de l'écroutissage croissant avec une diminution rapide du taux de contractance plastique due à l'augmentation de la surface de contact entre les grains. Ces trois phases jouent un rôle très important dans l'interaction fluide-structure.

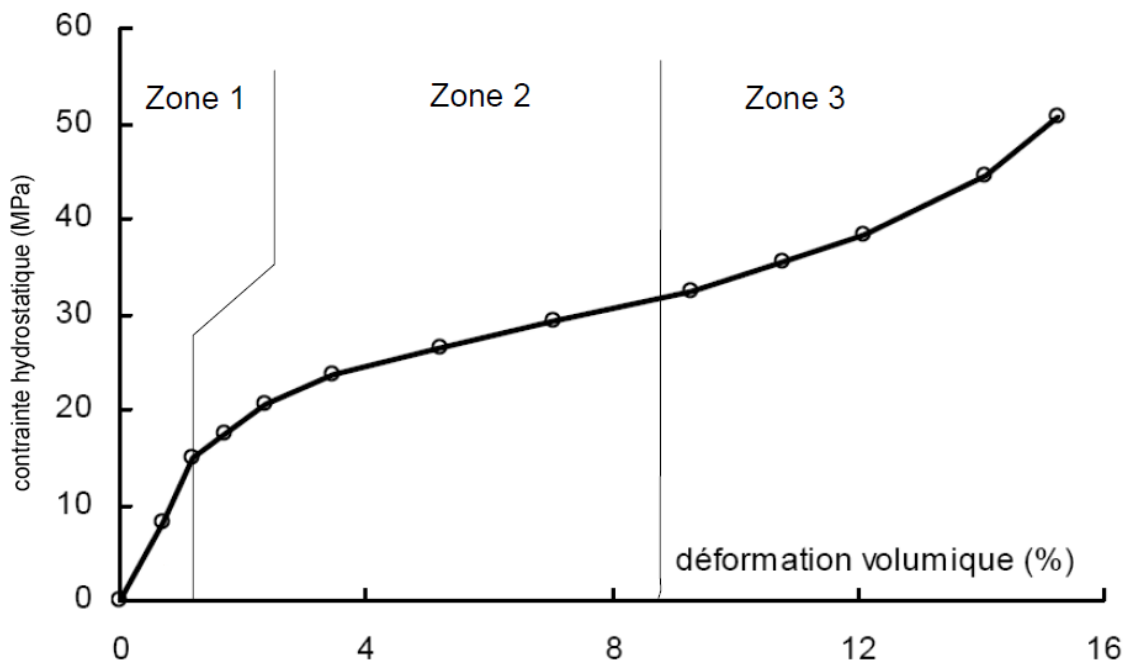


Figure 2.4 Essai de compression hydrostatique de la craie de Lixhe (Xie 2005)

De façon générale, le mécanisme prédominant lors d'une compression hydrostatique est celui dit de « pore-collapse » (Homand et Shao 2000). Il est également constaté que la déformation plastique de la craie est essentiellement engendrée par la réduction irréversible de l'espace poreux (compressibilité négligeable du squelette). La limite élastique en compression hydrostatique est appelée « seuil de pore collapse », varie d'une craie à une autre en fonction de la porosité et des conditions de saturation. Quand cette valeur est atteinte, le module de compressibilité tend à diminuer pour la majorité des craies.

2.3.1.2. Comportement sous contrainte déviatorique

Plusieurs études réalisées sur différentes craies montrent une concordance du comportement déviatorique (Siwak et al. 1994, Collin et al. 2002, Xie 2005, Nguyen 2009, Lafrance 2016, Geremia et al. 2021). En général, la craie présente deux comportements distincts selon la pression de confinement appliquée (Figure 2.5). À des faibles confinements, elle présente un comportement élastique suivi d'une phase d'écroutissement jusqu'à l'apparition d'un pic de rupture. Le comportement post-rupture quant à lui est radoucissant. En revanche au fur et à mesure que la pression augmente, son comportement devient ductile, la rupture devient de plus en plus plastique tandis que la phase « pseudo-élastique » se réduit jusqu'à disparaître. Le pic de rupture est lui aussi de moins en moins prononcé jusqu'à sa disparition pour des pressions élevées. Pour des pressions de confinement encore plus élevées (supérieures à la limite élastique hydrostatique), elle présente un comportement élastique avec écroutissement. Comme pour la plupart des roches, la limite élastique augmente avec la contrainte de confinement, tout comme contrainte déviatorique au pic.

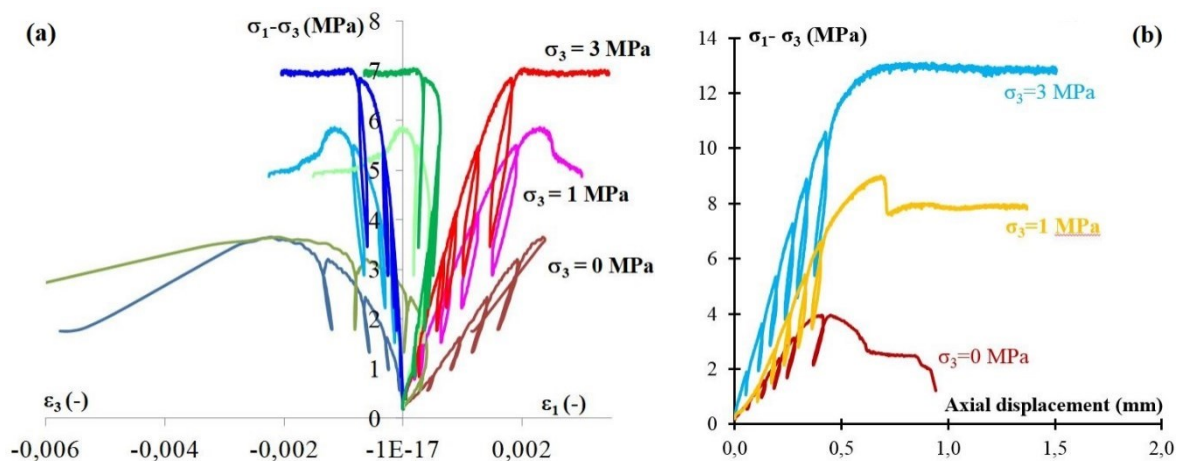


Figure 2.5 Essais de compression triaxiale sur la craie d'Estreux (Nord) à : (a) 98% d'humidité relative et (b) à l'état sec (Lafrance 2016)

2.3.2. Comportement mécanique à long terme

Le temps est un paramètre déterminant à prendre à compte lors de la compréhension des mécanismes liés au comportement mécanique des craies. L'effet du temps peut alors se traduire de deux façons à savoir le fluage (viscosité dépendante du matériau et du chargement) et le vieillissement (évolution des propriétés du matériau dans le temps) (Lafrance 2016).

L'essai de fluage à charge constante avec mesures en fonction du temps des déformations instantanées et différées permet d'apprécier le facteur temps dans le comportement de la craie. La déformation instantanée est la déformation acquise pendant la mise en charge. La déformation différée est celle obtenue au cours du temps à charge constante. Le fluage est un phénomène très important dans les craies, qui rend indispensable son étude lors de l'analyse des conditions de stabilité du matériau à long terme et la compréhension des mécanismes qui en sont à l'origine.

La courbe de fluage classique pour les géomatériaux est illustrée sur la Figure 2.6, montrant les trois phases courantes de fluage : le fluage primaire ou transitoire, le fluage secondaire ou stationnaire et enfin le fluage tertiaire ou accéléré (Siwak et al. 1994, Dahou et al. 1995, Xie 2005). La première phase, le fluage transitoire, est caractérisée par une diminution d'abord rapide (entraînant une déformation initiale de l'échantillon) puis de plus en plus lente de la vitesse de déformation. Cette dernière diminue donc avec le temps. La deuxième phase est le fluage en régime permanent (ou stationnaire, on parle aussi de fluage établi), où le taux de variation est plutôt stable (vitesse de déformation constante). La phase d'accélération ou de fluage accéléré quant à elle conduit rapidement à la rupture. Le fluage tertiaire a très peu été reporté pour la craie dans la littérature sauf pour des cas particuliers comme la craie de Lixhe où l'apparition et l'évolution du fluage tertiaire n'a eu lieu que pour des contraintes déviatoriques élevées sous confinements faibles (Xie 2005).

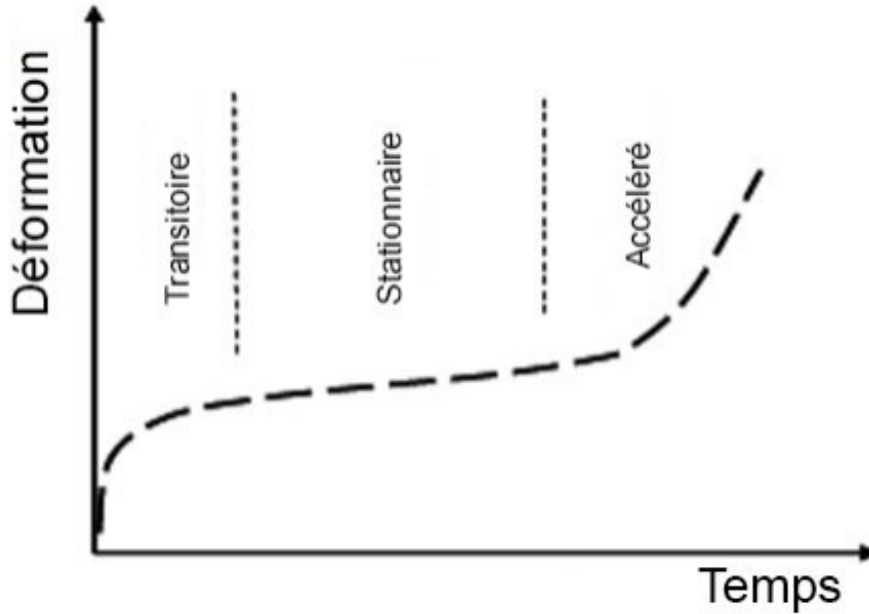


Figure 2.6 Illustration des 3 phases de fluage en fonction du temps, se produisant généralement sur les géomatériaux

Xie (2005) a réalisé plusieurs essais de fluage triaxiaux sur la craie de Lixhe saturée à l'eau (Figure 2.7). Toutes les déformations de fluage tendent vers une stabilisation après 3 jours. La déformation de fluage considérée comme viscoplastique devient de plus en plus prononcée avec l'augmentation des contraintes déviatoriques. D'une manière générale, le fluage transitoire (primaire) est seulement observé sous contraintes déviatoriques.

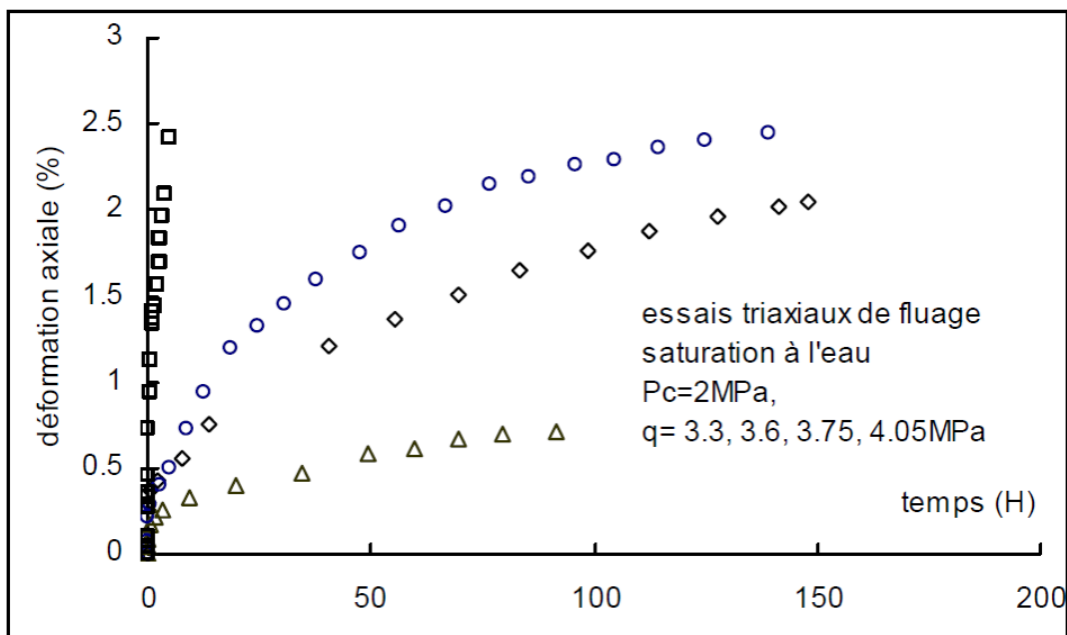


Figure 2.7 Essais de fluage triaxial sous pression de confinement de 2 MPa et différentes contraintes déviatoriques sur la craie de Lixhe (Xie 2005)

2.3.3. Influence de la porosité

La porosité et la surface spécifique sont deux paramètres qui caractérisent également la microstructure d'une roche. La porosité est définie comme l'ensemble des vides existants dans une roche. On distingue alors la porosité totale de la porosité connectée. La surface spécifique est définie quant à elle comme la surface massique cumulée des grains supposés sphériques en considérant la porosité connectée. Elle est généralement déterminée à partir de la distribution des pores au porosimètre au mercure.

La craie est un milieu poreux, multiphasique contenant de l'eau, de la calcite, de l'air et/ou de l'huile dans le cas des craies pétrolières dont un modèle conceptuel est montré sur la figure 2.8. A l'état naturel, la porosité de la craie présente une variabilité importante, on distingue des craies à faible porosité (10%) mais aussi à forte porosité (plus de 40%). Son influence s'étend sur l'ensemble du comportement mécanique de la craie, ceci est confirmé par la dispersion des valeurs des paramètres mécaniques déterminées pour les craies. Plusieurs études sur l'influence de la porosité sur la résistance des craies ont été menées. Gourri (1991) a déterminé les paramètres poroélastiques en fonction de la porosité sur plusieurs roches calcaires de porosité moyenne (13-22%). Matthews et Clayton (1993) ont quant à eux étudié les évolutions du module de Young, du coefficient de Poisson et de la résistance à la compression pour différentes valeurs de porosité (respectivement du poids volumique sec). Engstrøm (1992) a regroupé une étude statistique sur la variation des caractéristiques élastiques en prenant en compte l'effet de la porosité pour les craies danoises. Bahat et al. (2001) a quant à lui montré que le comportement d'une craie est d'autant plus fragile qu'elle est peu poreuse tandis que les fractures sont plus prononcées et nombreuses lorsque la craie est dense.

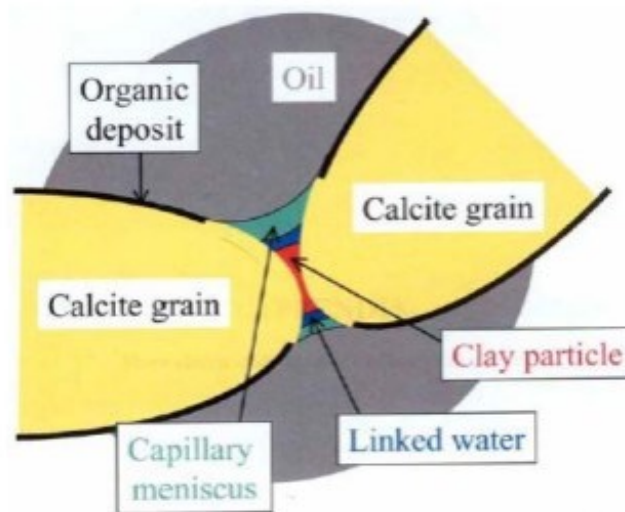


Figure 2.8 Modèle conceptuel des liaisons inter-particulaires pour une craie de Mer du Nord (Risnes et Flaageng 1999, Schroeder 2002)

2.3.4. Influence du fluide saturant

A l'instar de la porosité, la nature du fluide au sein des pores modifie le comportement mécanique de la craie. Deux fluides sont généralement distingués : l'eau et le pétrole (huile) dans les cas des craies pétrolières. Le fluide saturant modifie l'ensemble des propriétés mécaniques de la craie notamment la perméabilité, la résistance, le degré de saturation au travers de multiples interactions avec les grains de calcite.

Les effets du fluide saturant sur le comportement mécanique de la craie ont été étudiés à plusieurs reprises dans la littérature, notamment par Matthews et Clayton (1993), Risnes et al. (1994), Risnes et al. (1996), Schroeder et Shao (1996), Papamichos et al. (1997), Risnes et Flaageng (1999), Homand et Shao (2000), Gutierrez et al. (2000), Talesnick et al. (2001), Collin et al. (2002), De Gennaro et al. (2003), Risnes et al. (2005).

Une comparaison directe des courbes contrainte-déformation obtenues par Papamichos et al. (1997) pour des essais de compression isotrope sur des craies de Pietra Lecesce (Italie) avec différents teneurs en eau montre que la limite et le module d'élasticité diminuent à mesure que le degré de saturation en eau augmente (Figure 2.9).

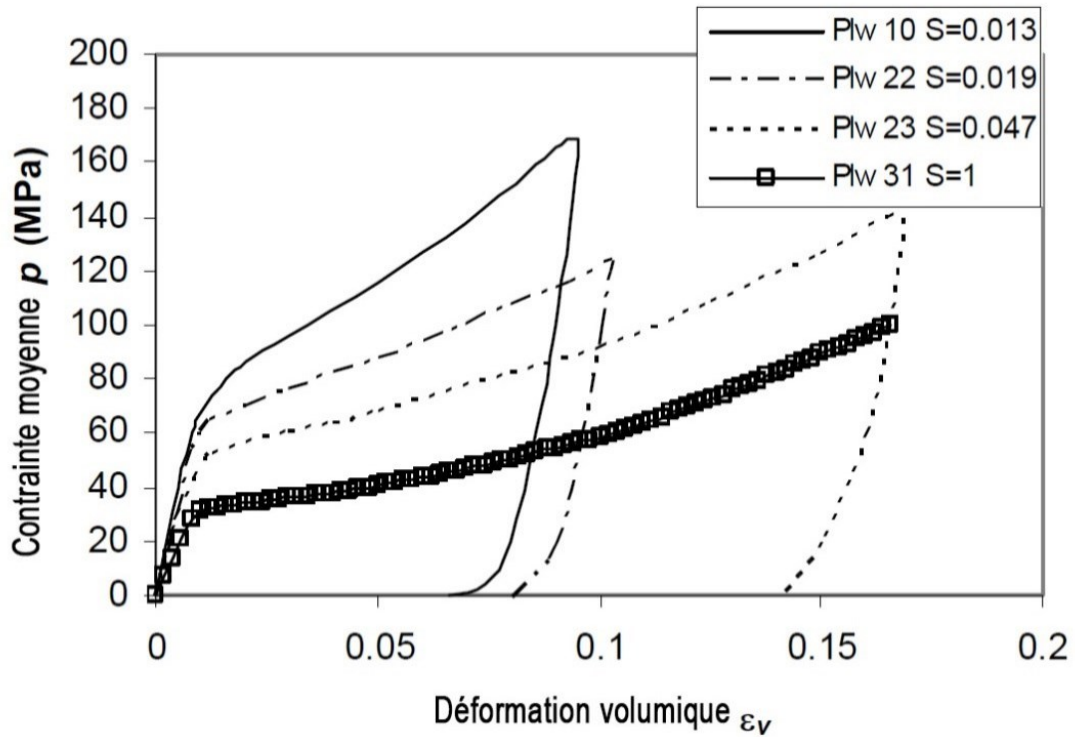


Figure 2.9 Essais de compression hydrostatique sur des craies de Pietra Lecesce à différents degrés de saturation en eau (Papamichos et al. 1997)

Dans la littérature, il a été régulièrement rapporté que la résistance de la craie sèche (saturée en air) est supérieure à celle de la craie saturée en huile qui à son tour est supérieure à celle de la craie saturée en eau. De tels résultats ont été montrés par Risnes et al. (1996), Homand et Shao (2000) et Collin et al. (2002) pour la craie de Lixhe; par Schroeder et Shao (1996) sur la craie d'Haubourdin (France); par Gutierrez et al. (2000) pour la craie de Lagerdorf (Allemagne). La figure 2.10 illustre un exemple de surfaces de charge fermées déduites de ces résultats expérimentaux par Collin et al. (2002).

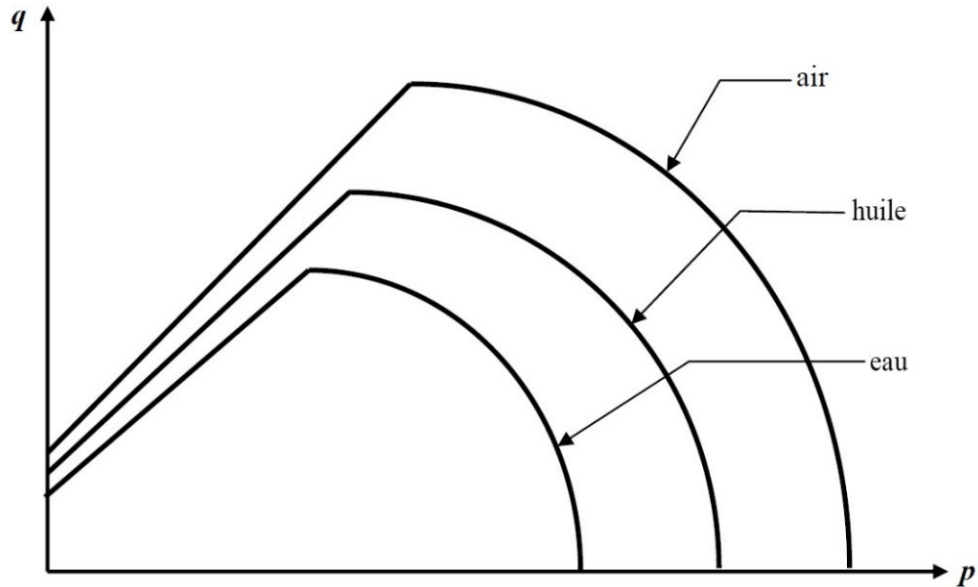


Figure 2.10 Surfaces de charge fermées d'une craie (sèche, saturée à l'huile et à l'eau) (Collin et al. 2002)

Le comportement mécanique à long terme de la craie est également influencé par le fluide de saturation. Schroeder et Shao (1996) ont montré que la vitesse de fluage de la craie saturée en eau est supérieure à celle de la craie saturée en huile, comme le montre la comparaison des résultats d'essais de fluage présentés à la figure 2.11.

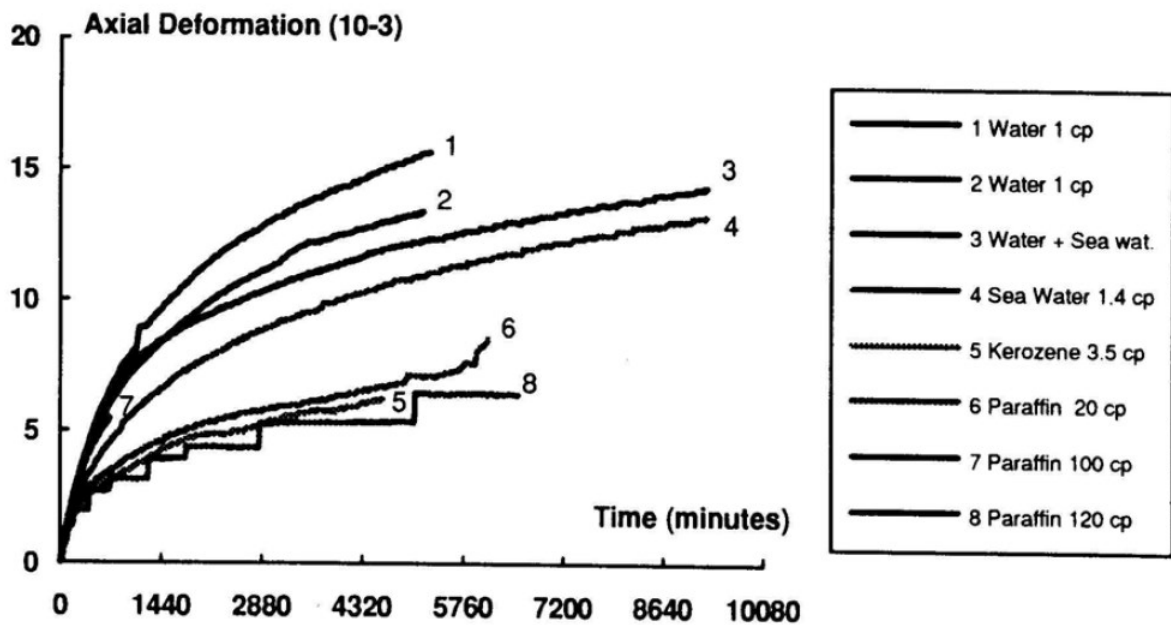


Figure 2.11 Essais de fluage sur la craie de Haubourdin saturées par différents fluides (Schroeder et Shao 1996)

Gutierrez et al. (2000) ont fait une revue complète des travaux assez diversifiés qui avaient été réalisés jusqu'alors, en séparant principalement les mécanismes liés à la saturation de la craie

en trois catégories : effets physiques, effets physico-chimiques et effets chimiques. Dans la première catégorie, le mécanisme physique le plus fréquemment étudié est l'impact de la pression capillaire. Ces effets impliquent la présence simultanée dans les pores d'un fluide mouillant et d'un fluide non mouillant qui ne sont pas miscibles. Cependant, Risnes et Flaageng (1999) ont montré que les forces capillaires ne pouvaient jouer qu'un rôle mineur dans l'interaction craie-fluide et ne peuvent expliquer à elles seules les mécanismes à l'origine de l'affaiblissement de la craie par l'eau. Les auteurs ont suggéré que les effets de la deuxième catégorie, les effets physico-chimiques, étaient un facteur dominant. Les effets physico-chimiques font référence à la corrosion sous contrainte (Hadizadeh et Law 1991), à l'adsorption de l'eau sur la surface de la craie (Rhett 1990) ou à l'effet de l'activité de l'eau lors de la modification de la concentration en ions du fluide saturant (Risnes et al. 2005). La dernière catégorie fait référence aux effets chimiques. Le phénomène de cristallisation/dissolution est un processus d'altération des roches calcaires riche en calcite (Hellemann et al. 2002). L'ensemble des équilibres chimiques participe à l'activité de l'eau dans la craie par le biais de potentiel chimique en fonction de sa molarité. Cependant, les effets chimiques ne sont pas jugés prépondérants et ils représentent un mécanisme secondaire (Risnes et al. 2005).

2.4. La craie de Château-Landon

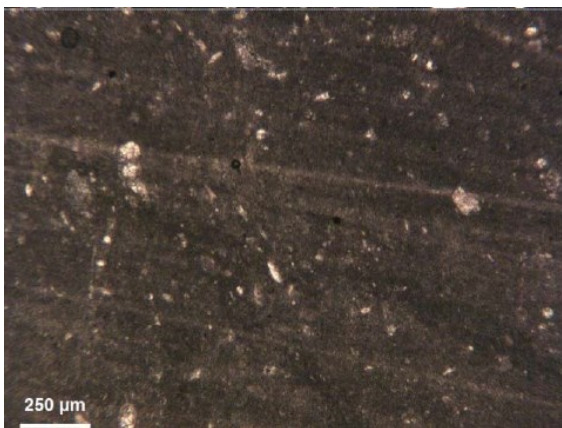
Dans cette section sont rappelées les principales caractéristiques physique et mécanique de la craie de Château-Landon obtenues lors de travaux précédents (Lafrance 2016, Munoz-Castelblanco et al. 2011). Comme mentionné dans le chapitre précédent, elle provient de la carrière Royer, seule carrière encore stable du secteur.

2.4.1. Minéralogie, pétrographie et propriétés physiques

L'étude des propriétés physiques passe obligatoirement par l'étude de sa pétrographie, sa minéralogie et sa structure. Ainsi une étude pétrographique visuelle des échantillons a été réalisée et une étude de lames minces au microscope optique polarisant accompagnée par celle au microscope électronique à balayage (MEB) a permis de la classer et de déterminer sa texture (Lafrance 2016). Les images obtenues au microscope optique polarisant en lumière analysée et non-analysée sont présentées sur la figure 2.12. Les résultats de ces études physiques ont montré que la craie est constituée :

- de 84% de micrite (boue de calcaire), 13% de sparite (cristaux de calcite) et 2,7% de minéraux opaques.
- à 97% de carbonate de calcium (CaCO_3) et est considérée comme une craie pure dans le diagramme ternaire calcite-calcarénite-argile (Schroeder 2002, adapté de Mortimore 1989).
- de plus elle a une texture de type mudstone selon la classification de Dunham.

Lumière polarisée non-analysée



Lumière polarisée analysée

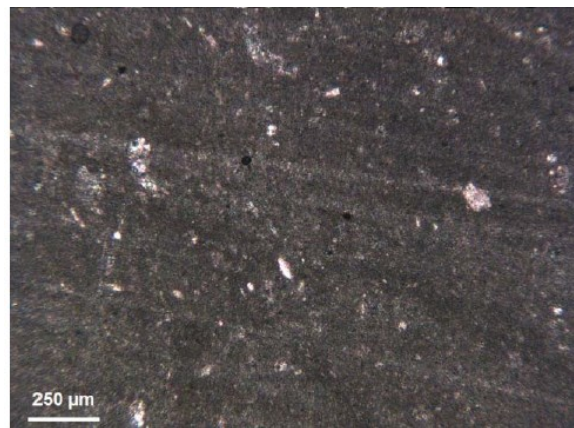


Figure 2.12 Analyses microscopiques de la craie de Château-Landon à l'aide de lames minces (Lafrance 2016)

Ses caractéristiques physiques moyennes présentées dans le tableau 2.2 ci-dessous sont déterminées à partir des méthodes suivantes :

- La masse volumique sèche selon la norme NF P 94-410-2.
- La masse volumique des grains au pycnomètre à hélium (procédure GeoRessources MR1-03 d'après XP CEN ISO/TS 17892-4).
- Les porosités totale et connectée par porosimétrie au mercure, elle donne alors les valeurs de porosités libre et piégée.
- La teneur en carbonates à l'aide du calcimètre de Dietrich-Fuhling suivant la norme NF P 94-048.
- La vitesse des ondes de compression et de cisaillement à partir de la norme NF P 94-411.
- La perméabilité à l'azote à l'aide d'un perméamètre de type IFP.
- La perméabilité à l'eau à partir d'une cellule triaxiale permettant d'appliquer un confinement et de faire passer le fluide (eau) à travers l'échantillon en condition drainée.

Tableau 2.2 Propriétés physiques de la craie de Château-Landon (Lafrance 2016)

Propriétés	Moyenne écart moyen
Teneur en carbonates, CaCO ₃ (%)	97
Indice des vides, e	0,8 ± 0,01
Porosité totale et connectée, n/n _c (%)	44/39 ± 1
Masse volumique sèche ρ _d (g. cm ⁻³)	1,56 ± 0,01
Masse volumique saturée ρ _{sat} (g. cm ⁻³)	1,98 ± 0,01
Masse volumique des grains ρ _s (g. cm ⁻³)	2,76
Surface spécifique, SS (m ² . g ⁻¹)	3,31
Perméabilité à l'eau, k _{H₂O} (m ²)	2,10 ⁻¹⁵
Perméabilité à l'azote, k _{N₂} (m ²)	3,10 ⁻¹⁴
Vitesse des ondes de compression, V _p sec/saturé (m. s ⁻¹)	2000 / 2200(±50)
Vitesse des ondes de cisaillement, V _s sec/saturé (m. s ⁻¹)	1200 / 950(±50)

La densité des grains solides ρ_s de la craie de Château-Landon est supérieure à celle de la calcite pure (ρ_s = 2,71 g. cm⁻³) et sa surface spécifique (SSA) est supérieure à celle de la craie de Précy-sur-Oise (SSA = 1,5 m².g⁻¹) qui est constituée à 100% de CaCO₃. Ceci est cohérent avec les résultats rapportés dans la littérature indiquant que la perméabilité de la matrice de la craie dépend principalement de la porosité et de la surface spécifique (Mortensen et al. 1998, Hjuler et Fabricius 2009, Nadah et al. 2013). Malgré sa porosité élevée (probablement due à l'arrangement des grains et à la morphologie de l'espace poreux), sa perméabilité est considérée relativement faible.

La distribution de la porosité ouverte de la craie de Château-Landon mesurée à la porosimétrie à mercure est présentée à la figure 2.13. Les résultats montrent que sa microstructure est caractérisée par une prédominance d'une famille de pores autour de 2,2 μm. Elle présente une densité importante de pores entre 0,5 μm et 3 μm ce qui est caractéristique des craies pures essentiellement constituées de coccolithes. Ceci indique que le séchage se fera principalement par la désaturation de cette famille de pores. La détermination de ses propriétés de rétention et sa caractérisation porosimétrique a montré la prédominance des effets capillaires dans l'interaction eau-craie.

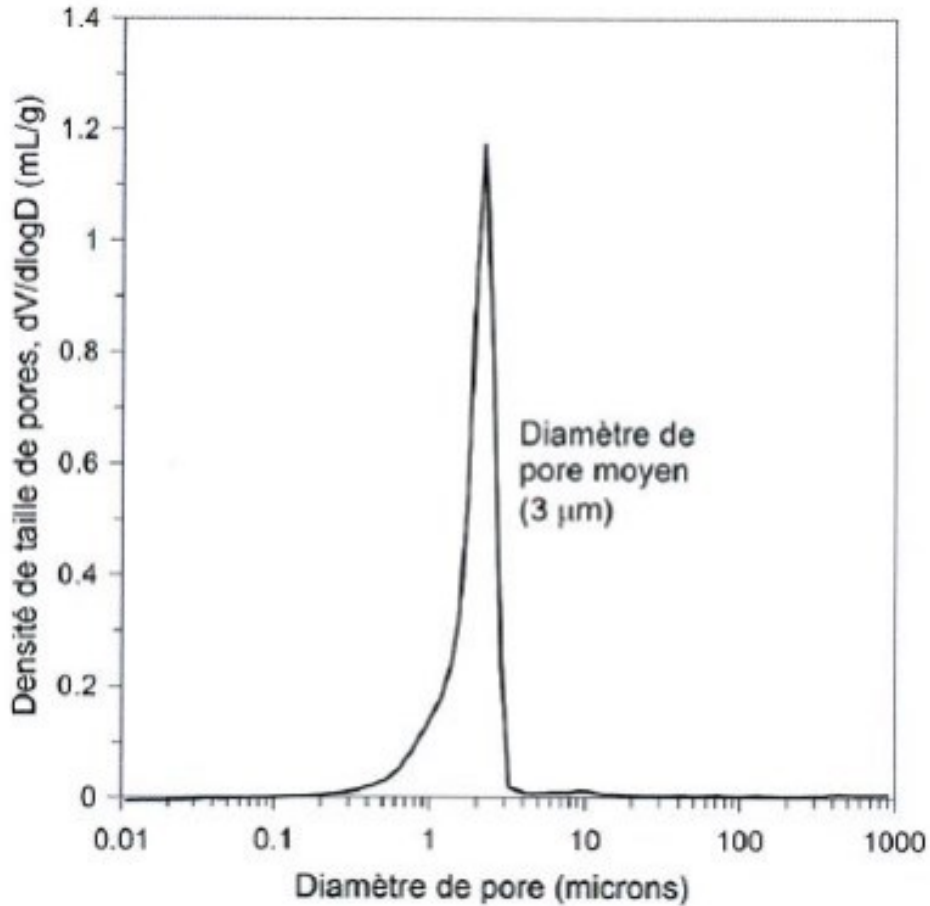


Figure 2.13 Porosimétrie de la craie de Château-Landon (Munoz-Castelblanco et al. 2011)

La figure 2.14 présente les images observées grâce au MEB des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans un des piliers de la carrière de Château-Landon. Aucun changement de taille ni de forme des grains n'est observé et la texture de la craie est similaire d'un bout à l'autre du sondage (Lafrance 2016). Cependant en surface, des grains de taille différente semblent s'agglutiner.

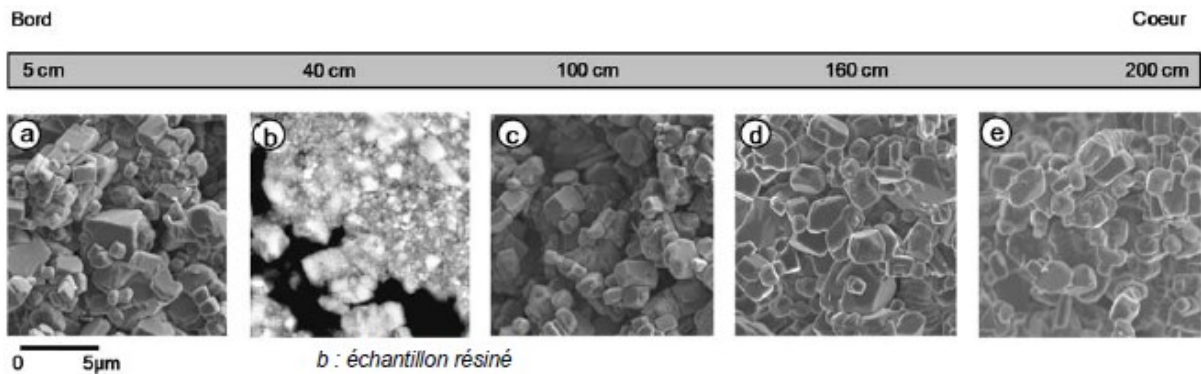


Figure 2.14 Photographies au MEB d'échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le pilier (Lafrance 2016)

2.4.2. Isotherme de sorption et courbe de rétention

La sorption est généralement définie comme le processus par lequel une substance est adsorbée ou absorbée par un matériau. Cela peut inclure l'adhérence de molécules ou d'ions à la surface du matériau (adsorption) ou la pénétration à l'intérieur de la structure du matériau (absorption). L'isotherme de sorption de la craie de Château-Landon a été obtenue à l'aide d'un adsorbmètre en contrôlant la quantité de vapeur injectée (l'hygrométrie) à température constante et est présentée à la figure 2.15. Les deux courbes présentées correspondent aux chemins d'imbibition et de séchage. Les résultats montrent que les interactions eau-craie pour cette craie sont majoritairement dues à la capillarité mais aussi à de la physisorption (Lafrance 2016).

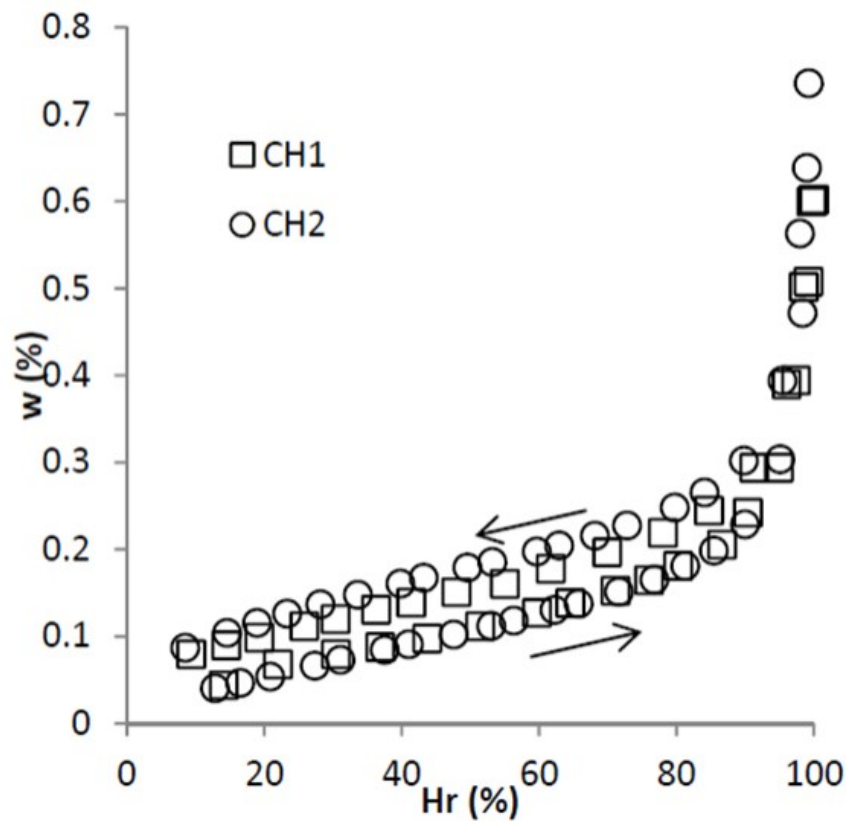


Figure 2.15 Isotherme de sorption de la craie de Château-Landon (Lafrance 2016)

Les courbes de rétention d'eau expérimentale et déduite de la courbe porosimétrique de la craie de Château-Landon sont présentées à la figure 2.16. Expérimentalement, deux chemins de séchage sont obtenus respectivement avec la méthode du papier filtre et le tensiomètre et un chemin d'humidification au tensiomètre. La différence entre les deux chemins provient du phénomène d'hystérésis hydraulique dû à une organisation du réseau de pores dans le matériau et à la nature du processus de transfert d'eau dans le milieu poreux. L'intrusion au mercure dans un milieu poreux quant à lui est associé à un processus de séchage car il est comparable au séchage d'un matériau dans lequel l'air (non-mouillant) déplace l'eau (mouillante) contenue dans les pores. On observe donc une très bonne correspondance avec la courbe déduite de la porosimétrie et le chemin de séchage au tensiomètre. Ceci confirme que les interactions entre l'eau et la craie sont majoritairement de nature capillaire.

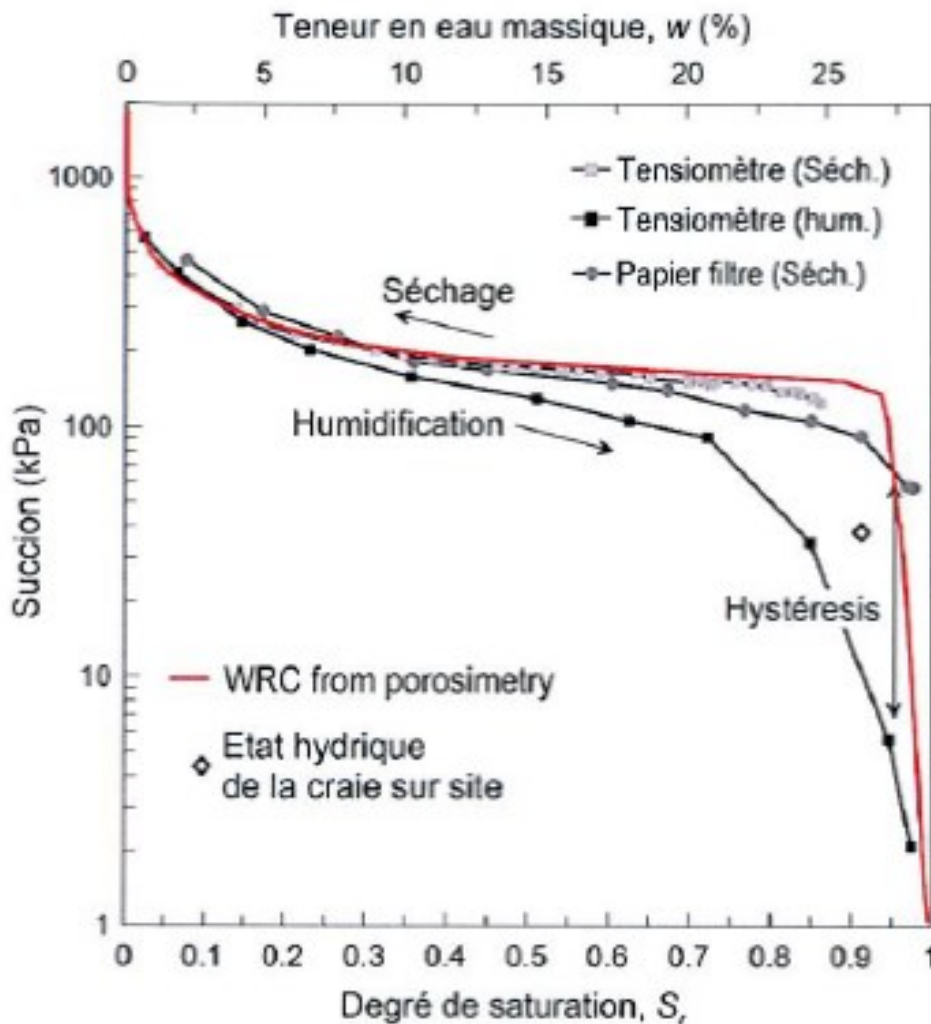


Figure 2.16 Courbes de rétention d'eau de la craie de Château-Landon (Munoz-Castelblanco et al. 2011)

2.4.3. Propriétés mécaniques

2.4.3.1. Compression uniaxiale

Des essais de compression simple à différents degrés de saturation ont été réalisés sur la craie de Château-Landon (Munoz-Castelblanco et al. 2011, Lafrance 2016). Ils montrent une augmentation de la résistance et du module de déformation initial avec la diminution du degré de saturation (Figure 2.17). Un comportement fragile est observé aux degrés de saturation de 60%, 86% et 92%. En s'approchant de la saturation, le comportement devient de plus en plus ductile et à saturation un comportement très plastique est observé. Il s'agit d'une craie très sensible à l'eau. Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale obtenues à l'état sec et saturé par Lafrance (2016) sur la même craie, apparaissent plus importantes que celle de Munoz-Castelblanco et al. (2011) comme l'indique la figure 2.18.

Néanmoins, les deux auteurs indiquent clairement l'impact capital de la saturation de cette craie sur sa résistance et donc sur le comportement à l'échelle du pilier. Enfin, ces travaux relient également le comportement fragile à l'état sec de cette craie à l'état des piliers en leur surface (le degré de saturation étant d'autant plus faible de la surface vers le cœur du pilier) et de l'absence de confinement qui pourrait augmenter la résistance.

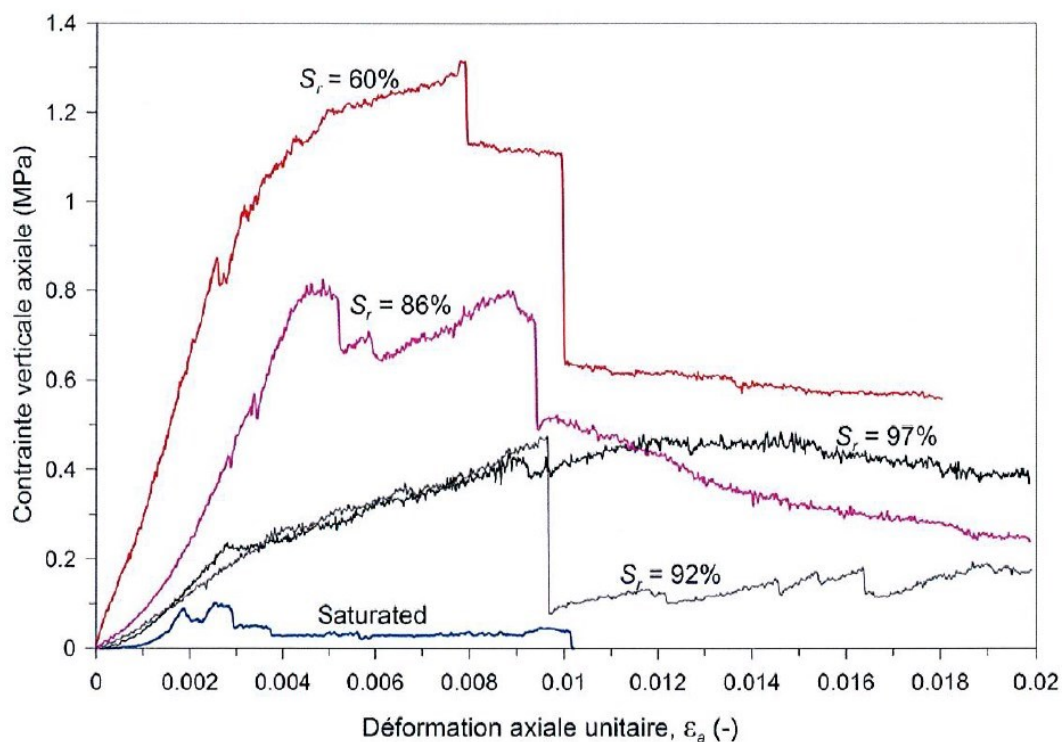


Figure 2.17 Essais de compression simple à différents degrés de saturation de 60%, 86%, 92%, 97% et 100% (Munoz-Castelblanco et al. 2011)

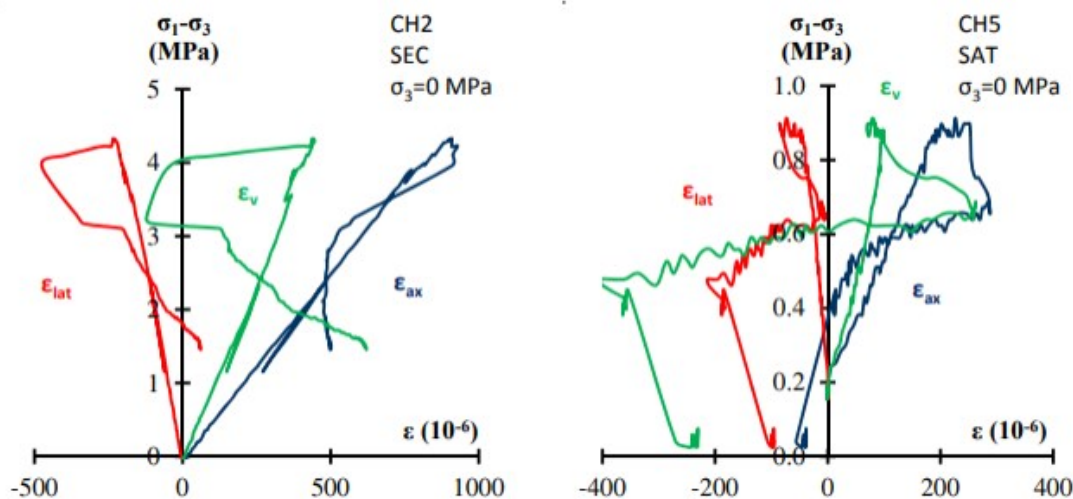


Figure 2.18 Courbes contrainte-déformation de deux essais de compression uniaxiale pour un état sec et saturé (Lafrance 2016)

2.4.3.2. Compression triaxiale

Des essais de compression triaxiale à différentes pressions de confinement ont également été réalisés par Lafrance (2016). Toutefois les résultats présentés à la figure 2.19 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ne traitent que de l'état sec de la craie car sa forte sensibilité à l'eau a rendu son instrumentation difficile car les jauges se détachaient facilement à l'état saturé ne rendant pas très fiables les résultats obtenus (l'exemple est donné sur la figure 2.18) et ce, même en utilisant des colliers LVDT.

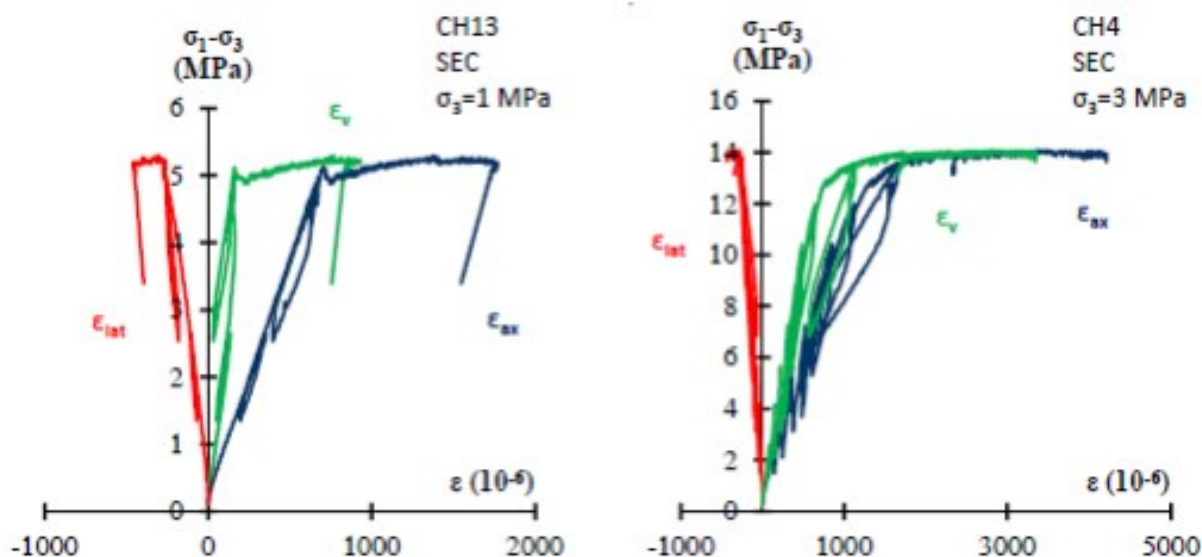


Figure 2.19 Courbes contrainte-déformation de deux essais de compression triaxiale à 1 et 3 MPa de confinement à l'état sec (Lafrance 2016)

2.4.3.3. Fluage uniaxial

La figure 2.20 présente les déformations différées axiale ε_{ax}^{vp} , latérale ε_{lat}^{vp} , volumique ε_v^{vp} et déviatorique $\varepsilon_{\acute{e}q}^{vp}$ en fonction du temps d'un échantillon à une hygrométrie de 85% avec indication du palier de contrainte appliquée. Les résultats montrent que le fluage s'enclenche dès l'application d'un faible déviateur (0,5 MPa), bien que les déformations différées restent très faibles. Pour ce palier, les déformations se font essentiellement latéralement ce qui confère à cette craie son comportement dilatant. Après l'augmentation du déviateur (passage à 1 MPa), les vitesses de déformation augmentent brusquement, aussi bien dans la direction axiale que latérale. Plusieurs hygrométries (entre 90 et 98%) les plus représentatives des conditions in situ ont été testées, malheureusement sans atteindre même le 1^{er} palier de contrainte de 0.5 MPa. Ce manque de données n'a pas permis à Lafrance (2016) de statuer sur le rôle exact de l'hygrométrie sur le fluage de cette craie, contrairement aux deux craies (Estreux et Saint-Martin-le-Nœud) étudiées par l'autrice.

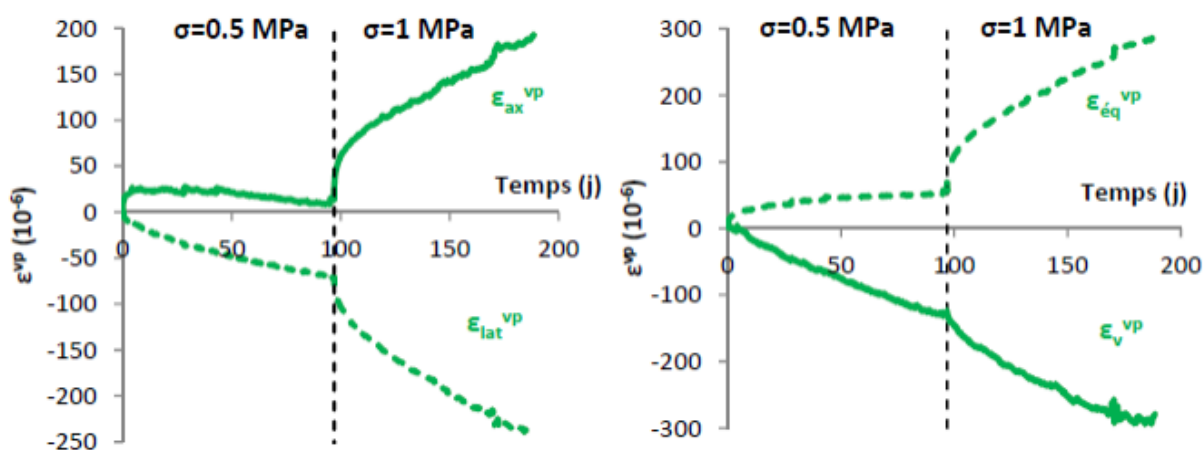


Figure 2.20 Courbes de fluage sur un échantillon de craie partiellement saturé (Lafrance 2016)

2.5. Modèles de comportement de la craie

Jusqu'au début des années 70, le comportement mécanique de la craie n'a été étudié qu'à de faibles niveaux de contraintes et le critère de Mohr- Coulomb suffisait pour le décrire. De nos jours, on dispose d'une "bibliothèque" relativement importante de modèles rhéologiques pour les géomatériaux. Une synthèse de modèles développés pour reproduire le comportement de la craie est présentée dans cette section. Plusieurs aspects du comportement complexe de la craie sont pris en compte : son comportement mécanique typique dans le cadre de la théorie de l'élastoplasticité, sa viscosité et son comportement multiphasique mais également l'influence du fluide saturant.

2.5.1. Modèles élastoplastiques

Un matériau est élastoplastique lorsqu'il présente des déformations pouvant être à la fois réversibles et irréversibles, indépendamment du temps (ou de la vitesse de mise en charge). Les déformations irréversibles sont généralement caractérisées par des surfaces de charge qui varient en fonction de la position des contraintes dans l'espace des contraintes principales (ou tout autre espace des contraintes) et de la direction de l'incrément de contrainte.

Un modèle élastoplastique s'appuie généralement sur les trois données suivantes :

- une surface de charge qui décrit le seuil de plasticité ;
- une loi d'écrouissage qui décrit les variations de forme, de dimension et de position de la surface de charge dans l'espace des contraintes ;
- une règle d'écoulement plastique qui décrit l'évolution des déformations plastiques.

Les modèles élastoplastiques reposent sur les concepts suivants illustrés sur la figure 2.21 :

1. l'ensemble des états de contrainte admissibles dans le matériau délimité par la surface de charge ;
2. le comportement d'un matériau est élastique lorsque son état de contrainte est en dessous à la surface de charge (ou à l'intérieur si celle-ci est fermée : ce qui est le cas des roches très poreuses), et élastoplastique lorsque son état de contrainte est sur la surface de charge ;
3. la réponse plastique ou irréversible d'un matériau ne dépend pas de la charge appliquée de manière incrémentale, mais de son état de contrainte ;
4. la fonction de charge et l'ensemble des états de contrainte admissibles peuvent changer au fur et à mesure que la charge augmente. Cette évolution est fonction d'un phénomène plastique, généralement la déformation plastique.

Un exemple de modèle élastoplastique simple est le modèle sans écrouissage de Mohr-Coulomb avec une direction d'écoulement plastique constante et une élasticité linéaire ; dans ce modèle la surface de charge (unique) représente également la surface de rupture. Un modèle élastoplastique plus complexe est le modèle Cam-Clay. Ce modèle ne comporte également qu'une seule surface de charge, mais se complexifie en intégrant une surface de charge évolutive (introduction d'une loi d'écrouissage). L'une des limites des modèles élastoplastiques est que les effets du temps et de la vitesse de chargement n'apparaissent pas

dans les équations constitutives ; toutefois, ces effets peuvent être incorporés dans ces modèles en reformulant le modèle dans le cadre de la viscoplasticité ou élastoplasticité.

La plupart des modèles constitutifs proposés pour la craie sont des modèles élastoplastiques. On distingue dans la littérature plusieurs modèles élastoplastiques dont les modèles basés sur le modèle de Cam-Clay (Charlier et Radu 2017) et Rhett et Teufel 1992) mais aussi les modèles développés par Shao et Henry (1991), Siwak (1994), Mikolajczak et al. (1995) ou Homand et Shao (2000). La plupart des modèles (à court terme) de comportement des géomatériaux poreux plus généralement se basent sur une surface de charge « fermée » écouissable de forme sphérique, elliptique ou composite 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 » avec des applications pétrolières. Siwak et al. (1994) ont montré que le comportement mécanique de quatre craies peut être modélisé à partir du modèle élastoplastique de Lade (1977) à deux mécanismes (cisaillement et « pore collapse »). Mikolajczak et al. (1995) quant à eux ont comparé quatre modèles : Cam-Clay modifié, Nova (1992), Lade (1977) et Desai et Salami (1987) sur des craies blanches.

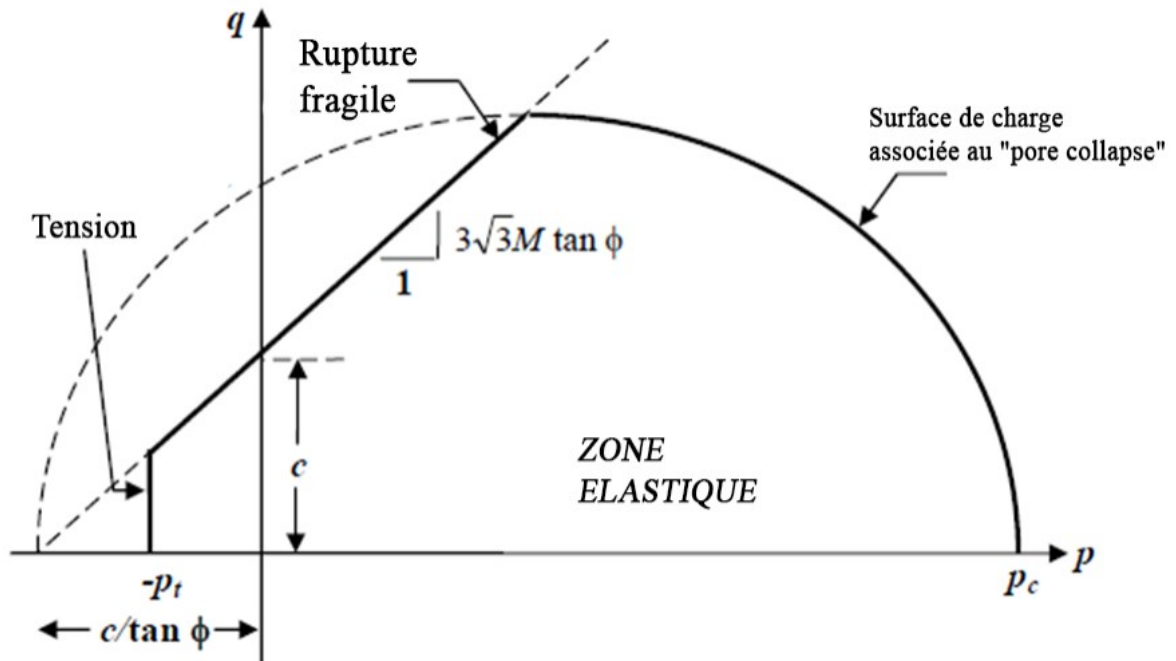


Figure 2.21 Surface de charge multi-mécanisme d'un modèle élastoplastique (Nguyen 2009)

2.5.2. Modèles visco-élastoplastiques

Les modèles visco-élastoplastiques sont très similaires aux modèles élastoplastiques, la seule différence étant la prise en compte des effets de la vitesse de chargement dans la formulation. Les concepts précédents sur lesquels les modèles visco-élastoplastiques sont basés sont les mêmes que ceux des modèles élastoplastiques, mais pour certaines formulations, des déformations inélastiques peuvent se produire pour des raisons autres que la charge mécanique. L'approche visco-élastoplastique originale (Perzyna, 1963) ne représente qu'une légère modification du modèle élastoplastique classique. Cependant, les états de contrainte sont autorisés à se situer temporairement en dehors de la surface de charge en raison des propriétés visqueuses du matériau. Avec le temps, la déformation plastique et l'écroutissement plastique se produisent et l'état de contrainte retourne à la surface de charge. Dans les formulations élastoviscoplastiques, le concept de comportement purement élastique disparaît et des déformations irréversibles s'accumulent continuellement.

De Gennaro et al. (2003), Datcheva et al. (2000) et Gutierrez (1999) ont proposé des modèles de comportement prenant en compte l'effet du temps dans le comportement mécanique. Les modèles de De Gennaro et al. (2003) et Datcheva et al. (2000) sont des modèles de « surcontrainte » de Perzyna décrit par :

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi \rangle \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.1)$$

où Φ représente la surface de charge viscoplastique, γ un paramètre lié à la viscosité, g le potentiel de fluage.

La vitesse de déformation viscoplastique ici varie de façon exponentielle avec la surcontrainte. La surface de référence n'est pas la surface de charge, mais elle est plus petite et a une forme similaire que celle-ci (Figure 2.22). Par conséquent, des déformations irréversibles se produisent même à des états de contrainte en-dessous de la surface de charge.

Le comportement de fluage de la craie a été modélisé par Andersen (1992) à l'aide du modèle de type taux logarithmique selon de Waal (1986). Une autre approche pour modéliser le fluage dans la craie a été proposée par Rhett (1994) en utilisant une relation linéaire entre (1/temps) et (1/déformation). Ce type de modèle conduit à une relation hyperbolique entre la durée du fluage et la déformation. De Gennaro et Pereira (2008) ont également développé un modèle prenant en compte l'effet du temps au moyen de l'effet de la vitesse de déformation. Ce modèle

appelé RASTRA (RATE of STRAIN model) est basé sur le modèle Isotach proposé par Suklje (1957), il a été appliqué à la craie d'Estreux par Nguyen (2009).

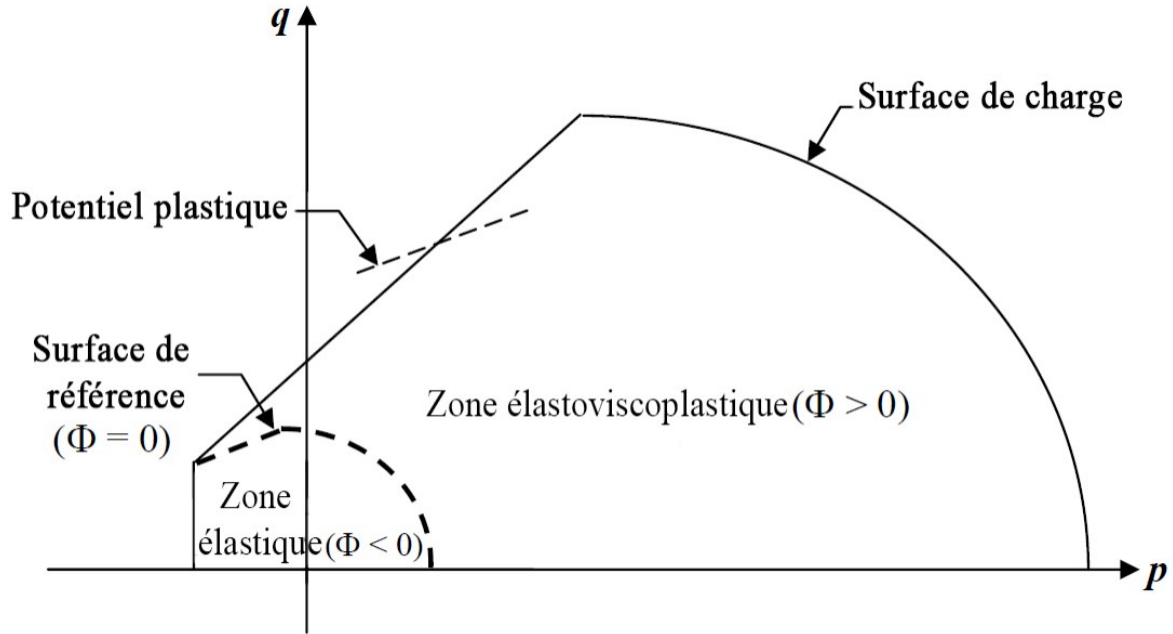


Figure 2.22 Surface de référence du modèle de De Gennaro et al. (2003)

2.5.3. Modèles dépendant du fluide saturant

Plusieurs modèles différents ont été proposés pour prendre en compte les effets du fluide saturant. De Gennaro et al. (2003) et Collin et al. (2002) utilisent le modèle de base de Barcelone (BBM) proposé par Alonso et al. (1990) pour les sols non saturés. Le BBM est formulé en utilisant la succion, qui est égale ici à la différence entre les pressions de l'huile (u_o) et de l'eau (u_w) dans la craie, comme variable indépendante. :

$$s = u_o - u_w \quad (2.2)$$

Le BBM sépare les déformations irréversibles en plusieurs composantes dépendantes des propriétés mécaniques (m) et de la succion (s) :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{m,e} + \varepsilon_{ij}^{s,e} + \varepsilon_{ij}^{m,p} + \varepsilon_{ij}^{s,p} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{ij}^{m,e} = C_{ijkl}^e \sigma_{kl} ; \varepsilon_{ij}^{s,e} = \frac{\kappa}{(1+e)} \frac{s}{(s+p_a)} \delta_{ij} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{ij}^{m,p} = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} ; \varepsilon_{ij}^{s,p} = \frac{\lambda - \kappa}{(1+e)} \frac{s}{(s+p_a)} \delta_{ij} \quad (2.5)$$

Où λ et κ respectivement les coefficients de compressibilité plastique et de gonflement élastique, e l'indice des vides, p_a la pression de l'air.

Les modèles de Collin et al. (2002) et DeGennaro et al. (2003) sont formulés de telle sorte que la cohésion et la contrainte de préconsolidation varient avec la succion, mais que l'angle de frottement reste indépendant de la succion.

Le modèle de Homand et Shao (2000) quant à lui est formulé de telle sorte que des déformations irréversibles varient en fonction de la saturation en eau. Contrairement au BBM, dans ce modèle la variation de la surface de charge n'est pas continue, se produit à une valeur limite de la saturation en eau S_{wc} et ne dépend pas de la succion (Figure 2.23). Les surfaces de charge diminuent avec l'augmentation de la saturation en eau. La cohésion, l'angle de frottement varient également lorsque la saturation en eau augmente.

L'effet de la saturation partielle et du fluide saturant a également été pris en compte dans le modèle de Papamichos et al. (1997) de la même manière que dans les modèles de De Gennaro et al. (2003) et Collin et al. (2002) présentés précédemment. Le concept de contrainte effective pour les sols non saturés, proposé par Bishop a été appliqué dans l'étude du comportement d'une craie partiellement saturée en eau. La surface de charge initiale de la craie dépend alors du degré de saturation. Le seuil de tension (qui sert de substitut à la cohésion) et la contrainte de préconsolidation varient tous deux en fonction de la saturation en eau. Le module d'élasticité diminue également lorsque la saturation en eau augmente, alors que le coefficient de Poisson n'est pas affecté.

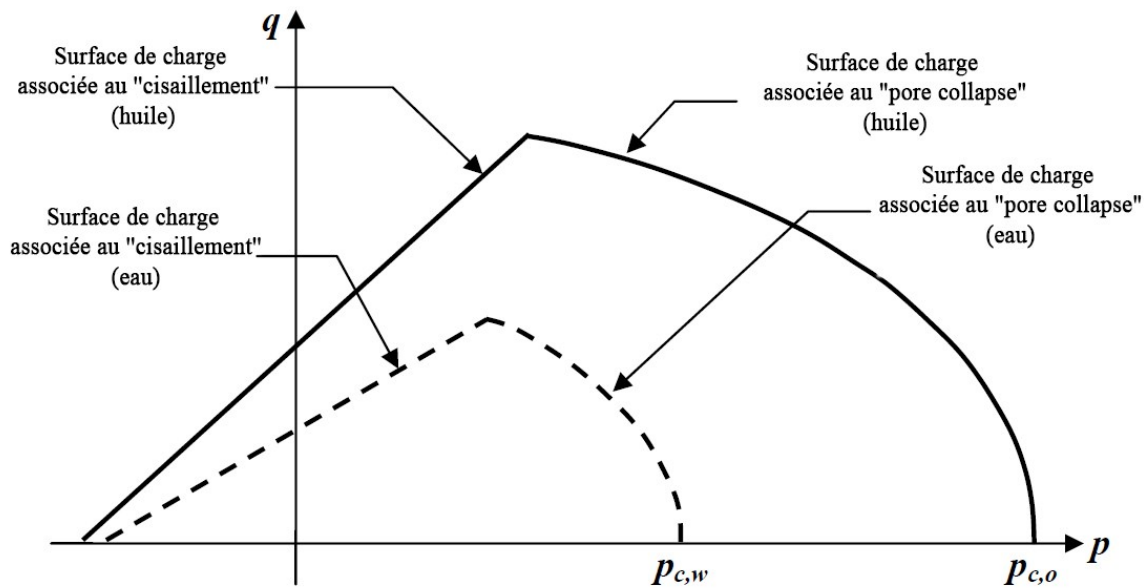


Figure 2.23 Surfaces de charge du modèle de Homand et Shao (2000)

2.5.4. Modèles de comportement basés sur la micromécanique

Nous venons de voir plusieurs modèles développés dans la littérature pour décrire le comportement des matériaux poreux tels que la craie. Le point commun de ces modèles basés sur une approche phénoménologique est que des surfaces de charge (unique fermée ou deux surfaces de charge pour décrire les mécanismes de cisaillement et d'effondrement des pores) non linéaires sont généralement nécessaires pour décrire la forte dépendance à la pression. Un grand nombre d'essais en laboratoire est souvent nécessaire pour les calibrer. Comme approche complémentaire et pour prendre en compte explicitement les effets de la porosité, des approches micromécaniques sont souvent proposées en utilisant différentes techniques d'homogénéisation. L'objectif est de déterminer une fonction de charge macroscopique qui est une fonction explicite de la porosité. Sur la base de ces critères homogénéisés et de lois d'écrouissage appropriées, certains modèles élastoplastiques basés sur la micromécanique ont été formulés pour les roches poreuses et appliqués à la craie sur la base du critère de Gurson (1977). Ce sont notamment les modèles proposés par Maghous et al. (2009), Monchiet et Kondo (2012), Shen et al. (2013), Shen et Shao (2016), Kondo (2019). Ils ont l'avantage de nécessiter moins d'essais en laboratoire et prennent en compte moins de paramètres. Nous reviendrons sur cette famille des modèles rhéologiques dans le dernier chapitre pour modéliser le comportement de la craie de Château-Landon en tenant en compte l'effet de la saturation.

2.6. Conclusion

L'étude bibliographique précédente a montré que les craies constituent une vaste famille de roches sédimentaires, et que leur comportement mécanique diffère selon plusieurs facteurs à savoir la porosité, la composition minéralogique ou encore le fluide saturant en raison de la complexité de la structure de la craie. Si le matériau peut être hétérogène à l'échelle microscopique les différentes études mettent en évidence l'homogénéité globale de la craie à l'échelle macroscopique.

Les études antérieures sur ce matériau confirment la forte sensibilité à l'eau de cette craie (Lafrance 2016) allant jusqu'à rendre difficile l'instrumentation nécessaire à son étude, notamment avec des jauges qui adhèrent difficilement à l'état saturé. Ainsi l'enjeu central de la caractérisation en laboratoire faisant l'objet du chapitre suivant était de réussir à mener des essais à saturation, et de mieux caractériser le comportement de ce matériau afin d'identifier les mécanismes de déformation et de rupture.

Chapitre 3 : Etude expérimentale du comportement de la craie de Château-Landon - influence de la saturation

Table des matières

3.1.	Introduction.....	63
3.2.	Campagne de prélèvement d'échantillons in-situ.....	63
3.3.	Conditions expérimentales.....	66
3.4.	Méthodologie d'étude et programme d'essais.....	71
3.5.	Etude expérimentale du comportement mécanique de la craie de Château-Landon	72
3.6.	Conclusion	85

3.1. Introduction

De nombreuses études expérimentales ont été menées au cours des dernières décennies pour comprendre le comportement mécanique de la craie à l'aide d'essais mécaniques (œdométrique, compression simple et triaxial) : Hazebrouck et Duthoit (1979) sur la craie blanche saturée et partiellement saturée; Homand et Shao (2000), De Gennaro et al. (2003), Priol (2005), Xie (2005) sur la craie de Lixhe, saturée à l'eau et au Soltrol; Dahou (1995) sur la craie de Lezennes; Bounenni (2002) sur la craie de la mer du Nord, Lafrance (2016) sur les craies d'Estreux, Saint-Martin-le-Noeud et Château-Landon et Geremia et al. (2021), Georgieva (2022) sur des craies du bassin de Mons. Ce chapitre se consacre à une étude du comportement mécanique de la craie de Château-Landon. Une campagne expérimentale méthodique a été entreprise intégrant des essais à court terme (compressions hydrostatiques et triaxiaux) et long terme (fluage). Elle permet de mettre en évidence les différents mécanismes de déformations induits par la variation de la saturation en eau. Ce chapitre vise ainsi à présenter les résultats de cette campagne expérimentale et à dresser un bilan des observations. Ce chapitre a également fait l'objet d'une publication scientifique (Pajiep et al. 2024).

3.2. Campagne de prélèvement d'échantillons in-situ

Afin de caractériser en laboratoire le comportement de cette craie, deux campagnes de prélèvement de carottes in situ ont été menées. L'intervention sur site dans cette carrière est soumise à une restriction pour des raisons écologiques (la carrière de Château-Landon abrite diverses espèces de chiroptères) qui limite l'accès entre fin novembre et fin avril.

La procédure d'échantillonnage in situ des matériaux suscite une préoccupation majeure en raison des multiples perturbations auxquelles le matériau est soumis, en passant par le carottage, le déconfinement, le conditionnement, au transport et la préparation en laboratoire. Chacune de ces étapes entraîne fréquemment une désaturation de la roche et des dommages potentiels. Diverses études menées sur différents types de roches préconisent d'envelopper immédiatement des carottes dès leur extraction afin de prévenir une exposition prolongée à l'air, Conil et al. 2018).

Lors de la première campagne, des sondages horizontaux de diamètre $\varnothing = 50$ mm ont été réalisés tandis que lors de la deuxième campagne des sondages horizontaux de diamètre $\varnothing = 110$ mm ont été réalisés (Figure 3.1). Ces carottes sont ensuite enrobées dans du film plastique

et conservées dans des sacs hermétiquement fermés et dépourvus d'air pour préserver leur état de saturation. Près de 15 m de carottes au total ont été prélevés (Figure 3.2).



Figure 3.1 Forages réalisés lors des deux campagnes de prélèvement : la première campagne à gauche et la deuxième à droite avec un diamètre plus grand



Figure 3.2 Carottes prélevées in-situ

Le tableau 3.1 récapitule les différentes caractéristiques des sondages réalisés et la figure 3.3 indique la localisation des forages dans la carrière.

Tableau 3.1 Caractéristiques des sondages : la zone 1 en bleu correspond à celle où les forages pour la thèse de Lafrance (2016) avaient été réalisés et la zone 2 en rouge correspond à un autre pilier choisi dans la carrière où aucun silex n'était retrouvé

Localisation des forages	Noms	Hauteur du forage (cm)	Profondeur du forage (cm)
Zone 1	SC 1	75	73
	SC 2	131	240
	SC 3	165	160
Zone 1	SC 4	165	175
	SC 5	140	224
	SC 6	75	175
Zone 2	SC 7	80	197
	SC 8	110	223
	SC 9	150	190
Zone 2	SC 10	93	210
	SC 11	134	200

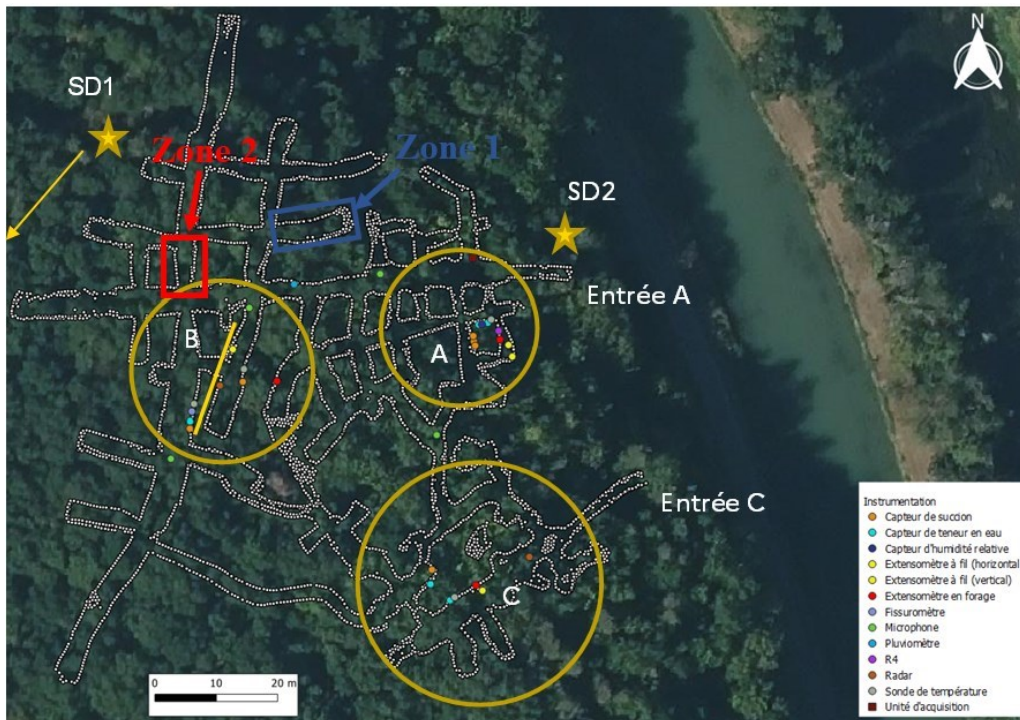


Figure 3.3 Localisation des zones 1 et 2 où ont été réalisés les prélèvements de carottes

3.3. Conditions expérimentales

Les résultats des essais dépendent fortement des conditions dans lesquelles ils ont été réalisés. Il est donc nécessaire de décrire les méthodes retenues pour effectuer notre caractérisation expérimentale.

3.3.1. Préparation des éprouvettes en laboratoire

Une fois au laboratoire, les échantillons prélevés in situ sont carottés à l'eau à l'aide d'un carottier de 36 mm (+/- 0,05 mm) et ensuite taillées puis rectifiées pour assurer la précision des formes géométriques (parallélisme des deux faces de l'échantillon et de l'axe de l'éprouvette par rapport aux faces) à l'aide d'une scie à fil diamantée (Figure 3.4). Les carottes utilisées pour les essais sont choisies en fonction de leur apparence, leur homogénéité et de l'absence de macro-fissures.



Figure 3.4 Scie à fil diamantée

Les caractéristiques géométriques moyennes des éprouvettes sont un diamètre de 36 mm pour une hauteur de 72 mm. Ces dimensions donnent un élancement classique de l'ordre de 2 permettant d'éviter des phénomènes de flambement (pour des élancements trop grands) et la présence de cône de frottement important (pour des élancements trop petits) (Paterson et Wong 2005, Jaeger et al. 2009).

3.3.2. Saturation des éprouvettes

Pour les **échantillons partiellement saturés**, ils ont d'abord été séchés dans une étuve à 105°C pendant 48 heures pour atteindre une saturation en eau minimale. Cette condition a été considérée comme la condition de référence d'une saturation en eau nulle, même si une petite quantité d'eau peut encore exister dans le matériau. Après leur sortie de l'étuve, les échantillons ont été immédiatement pesés (soit W_d le poids sec) puis placés dans des chambres hermétiques, chacune au-dessus d'une solution saline différente afin d'obtenir une humidité relative (RH) visée fixe (NF X 15-119 and NF EN ISO 483) comme présenté sur la figure 3.5 et le tableau 3.2. Les chambres ont donc été maintenues à une température ambiante contrôlée jusqu'à la réalisation de l'essai. Les échantillons de craie ont été pesés périodiquement jusqu'à l'obtention d'un poids final constant W_f , ce qui a permis d'obtenir la teneur en eau et la saturation à partir des formules suivantes :

$$w = \frac{W_f - W_d}{W_d} \quad (3.1)$$

$$S_w = \frac{W_f - W_d}{\rho_w \phi V} \quad (3.2)$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau, ϕ la porosité et V le volume total de l'échantillon.

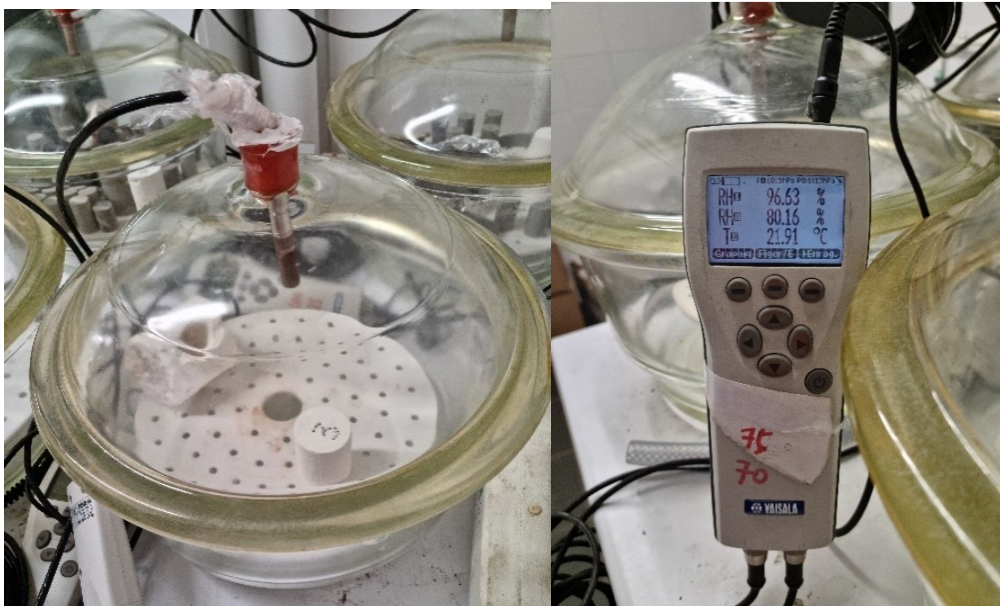


Figure 3.5 Chambre hermétique contenant les solutions salines et appareil de mesure numérique de l'humidité relative relié à chaque chambre

Tableau 3.2 Humidités relatives associées aux solutions salines

Solution saline	Humidité relative HR (%) à 20°C	Teneur en eau massique w (%)	Degré de saturation Sw (%)	Succions (kPa)
KOH	9,5	2,9	10	317
MgCl ₂	33,1	11,7	40	-
K ₂ CO ₃	43,2	17,6	60	114
Na ₂ SO ₄	92	23,9	80	11,3
K ₂ SO ₄	97,6	26,4	90	3,3

Quant à la **saturation totale** des échantillons, elle a été réalisée par percolation d'eau suivant les étapes ci-dessous :

1. L'échantillon est inséré à l'intérieur d'une membrane en caoutchouc. Le but de la membrane est d'empêcher l'échantillon d'entrer directement en contact avec le fluide de confinement (huile) tout en permettant à l'eau de s'écouler et de saturer l'échantillon ainsi que le drainage au cours de l'essai. Les échantillons ont d'abord été placés entre deux papiers-filtres (avec des pores de diamètre moyen de 6 µm) pour éviter que les petites particules de craie ne sortent et ensuite entre deux disques poreux en acier inoxydable (avec des pores de diamètre moyen de 20 µm) pour permettre à l'eau d'entrer et de sortir librement de l'échantillon.
2. Une pression de confinement de 0,5 MPa a été appliquée pour permettre à l'eau de s'écouler dans l'échantillon.
3. Le fluide de saturation utilisé est préparé à l'avance. De l'eau distillée a été mélangée à de la craie de Château-Landon broyée et filtrée afin d'être en équilibre chimique avec la craie et d'éviter un phénomène de dissolution. Cette eau est ensuite injectée avec un débit faible et contrôlé (0,1%/h) du bas vers le haut dans l'échantillon afin d'éviter une pression excessive qui pourrait endommager l'échantillon. La vanne est restée ouverte pour assurer l'évacuation de l'air et de l'eau pendant le processus d'hydratation.
4. Cette opération est ensuite contrôlée afin d'assurer un débit faible et contrôlé et d'éviter une pression excessive qui pourrait endommager l'échantillon. Le contrôle du processus de saturation est effectué en mesurant les volumes d'eau entrant et sortant.

Le processus de saturation se poursuit jusqu'à ce que l'échantillon atteigne un état d'équilibre. Lorsque la différence entre les volumes d'entrée et de sortie du fluide saturant se stabilise et devient constante, cela indique que l'échantillon a atteint une saturation complète. Cette opération dure généralement de 6 à 12 heures.

3.3.3. Dispositif expérimental

Tous les essais sont réalisés à l'aide d'une cellule triaxiale auto-compensée (Figure 3.6). Cette cellule est équipée d'un système permettant d'appliquer une force axiale purement déviatorique sans l'influence de confinement. Elle comprend trois parties principales : un chapeau auto-compensé, une enceinte de confinement et une embase. Le chapeau auto-compensé permet d'appliquer la contrainte déviatorique au moyen d'un système de pression qui permet la descente du piston. Cette contrainte déviatorique est directement mesurée par un capteur de force. L'enceinte de confinement est composée de l'échantillon et d'un système de mesure des déformations décrit ci-dessous. De l'huile a été utilisée comme fluide de confinement en raison de sa faible conductivité électrique. L'embase quant à elle contient des sorties drainées qui aident à l'injection de fluide dans l'échantillon. Tous les essais sont effectués dans des conditions drainées et réalisés à température ambiante moyenne de 20°C.

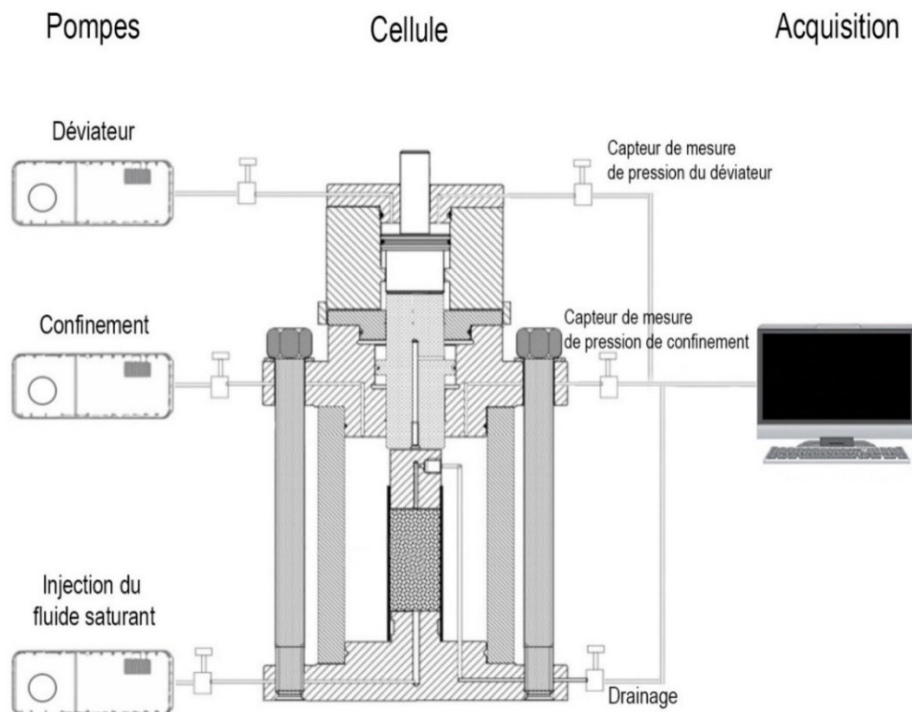


Figure 3.6 Dispositif expérimental

3.3.4. Système de mesure des déformations

Plusieurs méthodes ont été déployées au fil des années pour mesurer les déformations de l'échantillon au cours des essais. Parmi ces différentes méthodes on distingue : les jauges collées sur l'échantillon (Gourri 1991, Dahou 1995, Homand 2000, Mata 2001, Xie 2005), la méthode des capillaires (Dahou 1995, Sultan et al. 2000), le système LVDT (Barla et al. 1999, Priol 2005, Nguyen 2009) ou encore la mesure externe (Sultan 1997). L'utilisation des jauges collées sur la craie en générale est très délicate en raison de sa forte porosité souvent à l'origine de déformations importantes et des difficultés pour maintenir l'étanchéité de la membrane (Gourri 1991). Barla et al (1999) ont montré que la mesure externe de la déformation axiale sous-estime la rigidité de roches tendres, alors que le système LVDT permet de mieux l'estimer. Les travaux précédents de Lafrance (2016) ont montré également que l'utilisation des jauges sur cette craie ne permettaient pas une bonne exploitation des données, c'est la raison pour laquelle dans ce travail nous utilisons deux capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer) placés de part et d'autre autour de l'échantillon pour mesurer les déformations axiales et un collier placé à mi-hauteur de l'échantillon pour mesurer les déformations latérales (Figure 3.7).

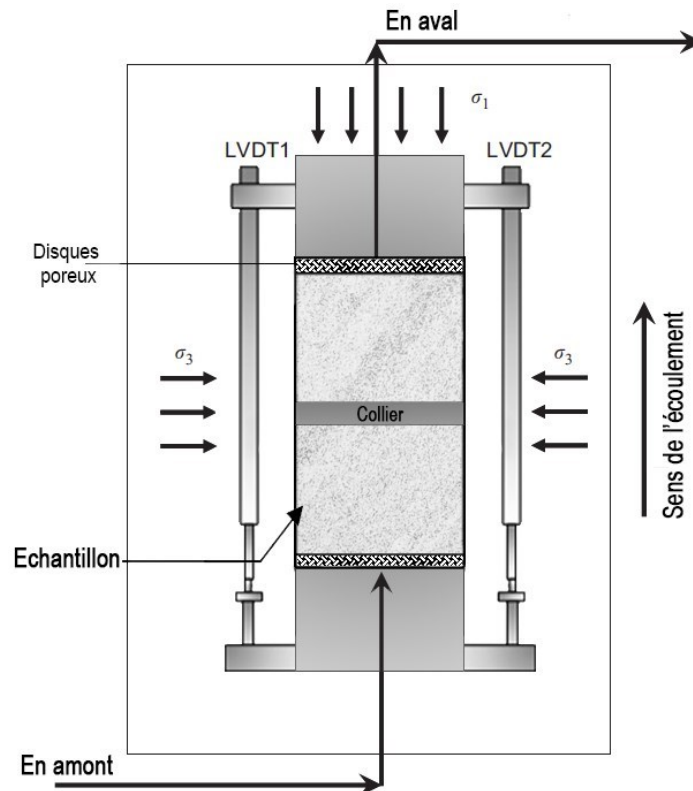


Figure 3.7 Illustration des conditions expérimentales

3.4. Méthodologie d'étude et programme d'essais

Les essais de compression uniaxiale présentés au chapitre précédent sur la craie de Château-Landon totalement saturée ont montré la difficulté d'obtenir des résultats exploitables lorsqu'aucune pression de confinement n'était appliquée en raison de sa forte sensibilité à l'eau. Pour éviter de rencontrer des problèmes similaires, aucun essai uniaxial n'a été réalisé mais une légère pression de confinement (0,5 MPa) a été appliquée. La contrainte verticale moyenne dans un pilier de la carrière a été calculée à partir de la hauteur des terrains de recouvrement d'environ 30 m dans la carrière Royer et d'un taux de défrètement moyen de 42% à partir de la méthode de l'aire Tributaire. Elle est de 1 MPa environ. Le degré de saturation a également été déduit à l'aide des propriétés physiques de la craie (porosité) et des valeurs des teneurs en eau volumique obtenues à partir de l'instrumentation (de 22% à 5cm de profondeur à 44% à 70 cm de profondeur). Il s'estime à 50% à la surface du pilier et 98% vers le cœur du pilier.

Le tableau 3.3 présente le programme des essais réalisés aux cinq degrés de saturation obtenus à partir des humidités relatives présentées à la section précédente (de 10 % à 100 %) et pressions de confinement (de 0,5 MPa à 3 MPa). Au total quinze essais ont été effectués : 5 essais de compression hydrostatique, 7 essais triaxiaux et 2 essais de fluage à différents niveaux de saturation. L'ensemble des essais a été réalisés sous conditions drainées. Une vitesse à chargement lente de l'ordre de 10^{-3} MPa/s en pression contrôlée ou 0.1 ml/mm en débit de pompe contrôlée a été adoptée pour respecter des conditions de sollicitations quasi-statique et éviter des suppressions interstitielles excessives. Cette vitesse correspond aux vitesses admissibles pour la craie dans la littérature (Schroeder 2002, De Gennaro et al. 2003, Priol 2005, Xie 2005, Nguyen 2009).

Tableau 3.3 Programme expérimental des essais

	Type d'essai	Pression de confinement (MPa)	Degré de saturation (%)
Essais à court terme	Compression hydrostatique	-	10 ; 40 ; 60 ; 90 ; 100
	Compression triaxiale	0,5	40 ; 90 ; 100
	Compression triaxiale	0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3	100
Essais à long terme	Fluage	1	40 ; 100

3.5. Etude expérimentale du comportement mécanique de la craie de Château-Landon

3.5.1. Caractérisation physique

Les masses volumiques sèche, saturée et solide sont obtenues au moyen de mêmes méthodes que Lafrance (2016) (voir chapitre précédent). La porosité totale de l'échantillon est obtenue par séchage à 105°C à l'étuve a été déterminée par pesée, sur des échantillons cylindriques et déduite grâce à la valeur de la masse volumique solide. La détermination de la teneur naturelle en eau quant à elle a été réalisée par séchage à l'étuve. Les échantillons prélevés in situ ont été pesés directement après leur extraction et avant séchage (avec leur teneur en eau naturelle). Après le processus de séchage, leurs masses ont été relevées lorsqu'ils ont atteint une valeur constante. La teneur en eau maximale moyenne est d'environ 29%, tous les blocs étaient donc presque saturés au moment du prélèvement. La comparaison de cette caractérisation physique avec la littérature est présentée dans le tableau 3.4 ci-dessous. Les résultats sont en accord avec les études antérieures de Lafrance (2016) et Munoz-Castelblanco et al. (2011).

Tableau 3.4 Etude comparative des propriétés physiques de la craie de Château-Landon

Propriétés	Pajiep (2024)	Lafrance (2016)	Munoz-Castelblanco et al. (2011)
Indice des vides, e	0,81	–	0,8
Porosité totale, n (%)	44,1	44	44,6
Teneur en eau naturelle, w (%)	29	30	28
Masse volumique des grains ρ_s (g. cm^{-3})	2,72	2,76	–
Masse volumique sèche ρ_d (g. cm^{-3})	1,50	1,56	1,54
Masse volumique saturée ρ_{sat} (g. cm^{-3})	1,94	2,02	1,98

3.5.2. Isotherme de sorption et courbe de rétention

Dans ces travaux, des solutions salines ont été utilisées pour créer des environnements à humidité contrôlée à l'intérieur d'une chambre hermétique (Figure 3.5). Ces solutions salines ont permis de contrôler l'humidité relative (RH) pour des valeurs allant de 9,5 % à 97,6 %. Il faut noter que la stabilisation des échantillons a duré plusieurs semaines voire mois en fonction de la taille des échantillons. La figure 3.8 présente l'isotherme d'adsorption d'eau mesurée pour la craie de Château-Landon. Comme observé dans la littérature (Taibi et al. 2009, Sorgi et al. 2011, Okhrimenko et al. 2013), la teneur en eau augmente avec l'humidité relative.

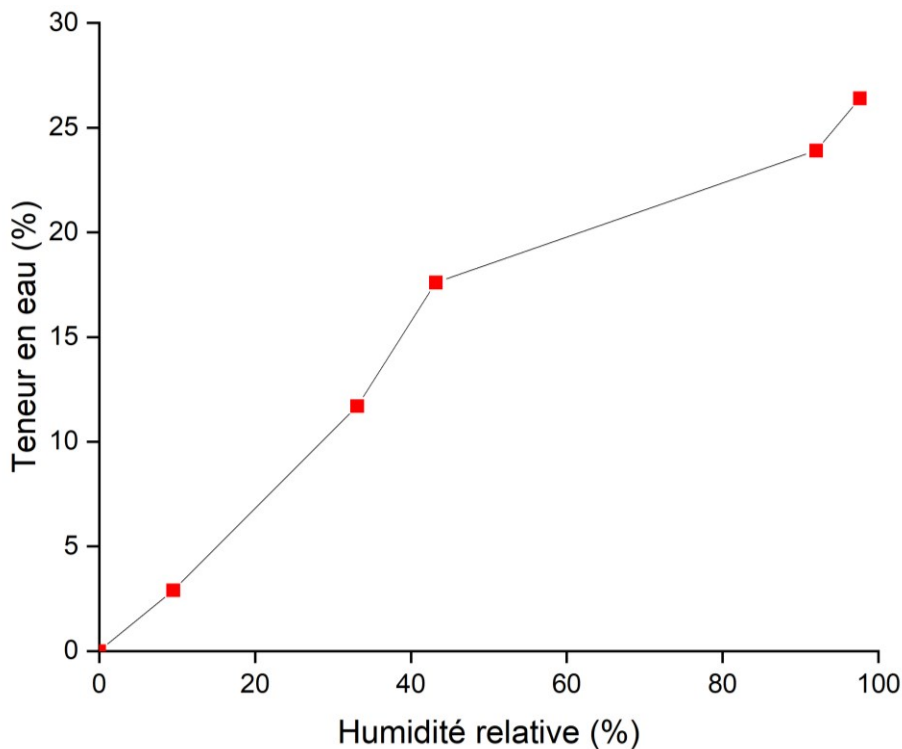


Figure 3.8 Isotherme d'adsorption de la craie de Château-Landon à 20°C (Pajiep et al. 2024)

La courbe de rétention quant à elle représente l'évolution du degré de saturation en fonction du logarithme de la succion. Elle permet de quantifier la capacité à retenir ou dégager l'eau selon des chemins de drainage ou d'humidification. Munoz-Castelblanco et al. (2011) ont étudié les propriétés de rétention d'eau de la craie de Château-Landon en utilisant un tensiomètre dans le chemin d'humidification (courbe noire - Fig. 3.9) et un porosimètre à mercure (courbe rouge - Fig. 3.9) comme présenté au chapitre précédent.

Les valeurs de succion mesurées dans cette étude à partir des différentes humidités relatives correspondant à un chemin d'humidification sont superposées dans la figure 3.9 (croix

rouges). Nos données expérimentales, en particulier à $RH = 9,5\%$ et $43,2\%$ (RH : Relative Humidity), présentent une bonne cohérence avec les résultats de leur courbe dérivée du tensiomètre. Cependant, la diminution soudaine de la saturation en eau au-dessus de 200 kPa suggère que les variations de l'humidité relative dans la carrière (en particulier entre 90% et 100%) peuvent modifier les conditions de saturation à la surface du pilier directement exposé à l'atmosphère. Les modifications de succion interviennent comme un chargement additionnel sur la craie, et intègrent également les processus physico-chimiques liés à l'interaction fluide-squelette, souvent à l'origine des mécanismes de dégradation mécanique et de vieillissement dans les géomatériaux (Nguyen 2009). Il apparaît nécessaire, donc, de bien caractériser la réponse mécanique de la craie lorsqu'elle est saturée et non-saturée.

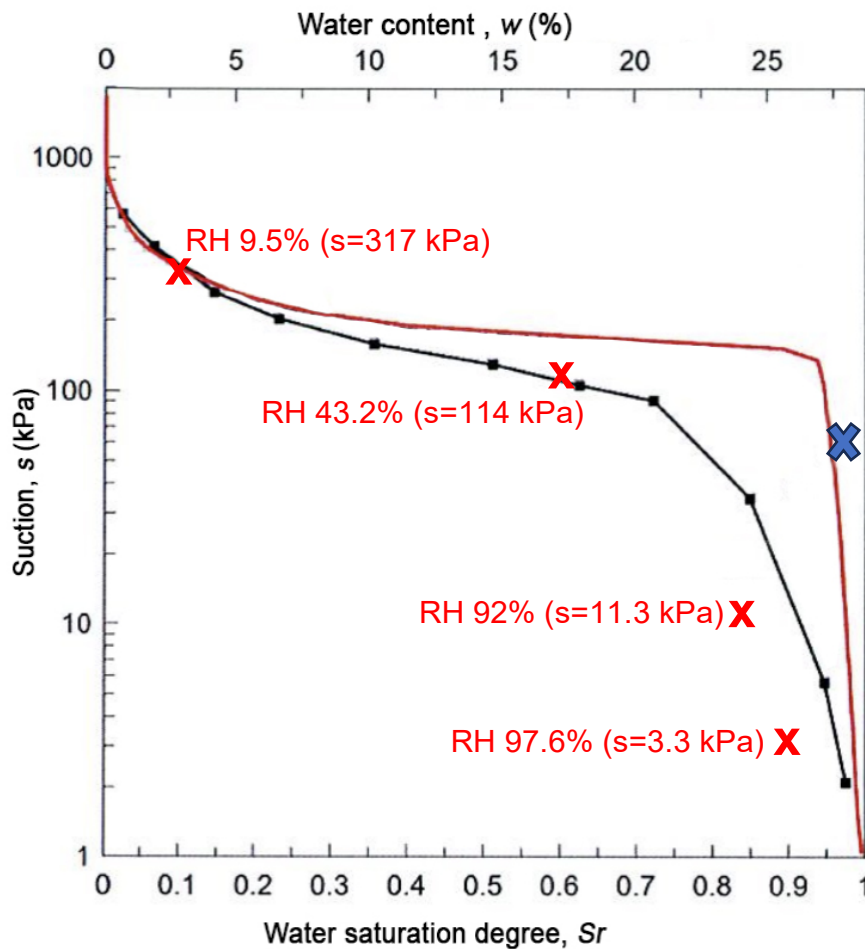


Figure 3.9 Courbe de rétention en eau de la craie de Château-Landon : porosimétrie (rouge) et tensiomètre (noir) représentant le chemin d'humidification (modifié d'après Munoz-Castelblanco et al. (2011) et points expérimentaux (croix rouges) et état hydrique in-situ ($53,5\text{kPa}$; 29%) (croix bleue)

3.5.3. Essais hydrostatiques

L'essai de compression hydrostatique ici consiste à soumettre le matériau à un champ de contrainte hydrostatique en condition drainée. La figure 3.10 présentent les résultats des cinq essais hydrostatiques effectués sur cette craie. Les trois phases du comportement mécanique présentées au chapitre précédent y sont retrouvées sur chacune des courbes. La première phase correspond à un comportement élastique quasi-linéaire. Elle disparaît peu à peu au fur et à mesure que le degré de saturation augmente. La deuxième phase correspond à une forte contraction plastique à la suite d'un effondrement progressif de la structure poreuse par rupture des ponts entre grains. La dernière phase met en évidence un écrouissage croissant avec une diminution rapide du taux de contraction plastique due à la croissance de la surface de contact entre les grains. L'influence du degré de saturation sera présentée plus en détail dans la discussion ci-dessous. Le mécanisme de « pore collapse » est bien mis en évidence ici et est en accord avec les observations effectuées sur d'autres craies (Schroeder 2002, Collin et al. 2002, Xie et Shao 2006, Xie 2005, Nguyen 2009, Lafrance 2016).

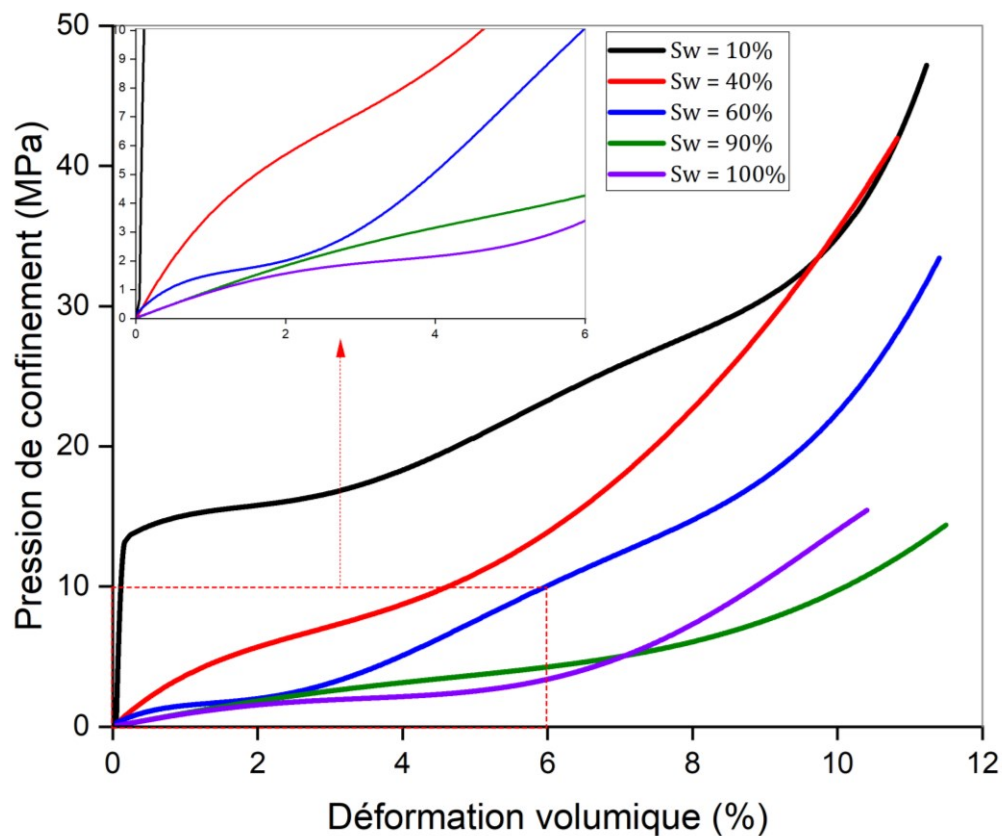


Figure 3.10 Comportement hydrostatique de la craie de Château-Landon à différents degrés de saturation (Pajiep et al. 2024)

3.5.4. Essais triaxiaux

Des essais déviatoriques à confinement constant ont été effectués afin de compléter les essais hydrostatiques. Ces essais ont alors été réalisés en deux phases : la première consiste, après saturation, à soumettre l'échantillon à un état de contraintes hydrostatiques maintenu constant jusqu'à la stabilisation des déformations enregistrées et la deuxième phase consiste à imposer une contrainte déviatorique en augmentant uniquement la contrainte axiale par l'application d'une force axiale à l'aide d'une pompe avec un débit constant. L'essai est alors mené jusqu'à grande déformation (aucune rupture n'a été observée). La mise en charge est suffisamment lente pour assurer le drainage simultané de l'échantillon.

3.5.4.1. Influence du degré de saturation à faible confinement

Des essais de compression triaxiale drainée ont été réalisés sous trois degrés de saturation en eau (40%, 90% et 100%) et une pression de confinement de 0,5 MPa (la plus petite valeur investiguée dans cette thèse et permettant de conduire complètement l'essai). Les réponses contraintes-déformations obtenues sont présentées sur la figure 3.11.

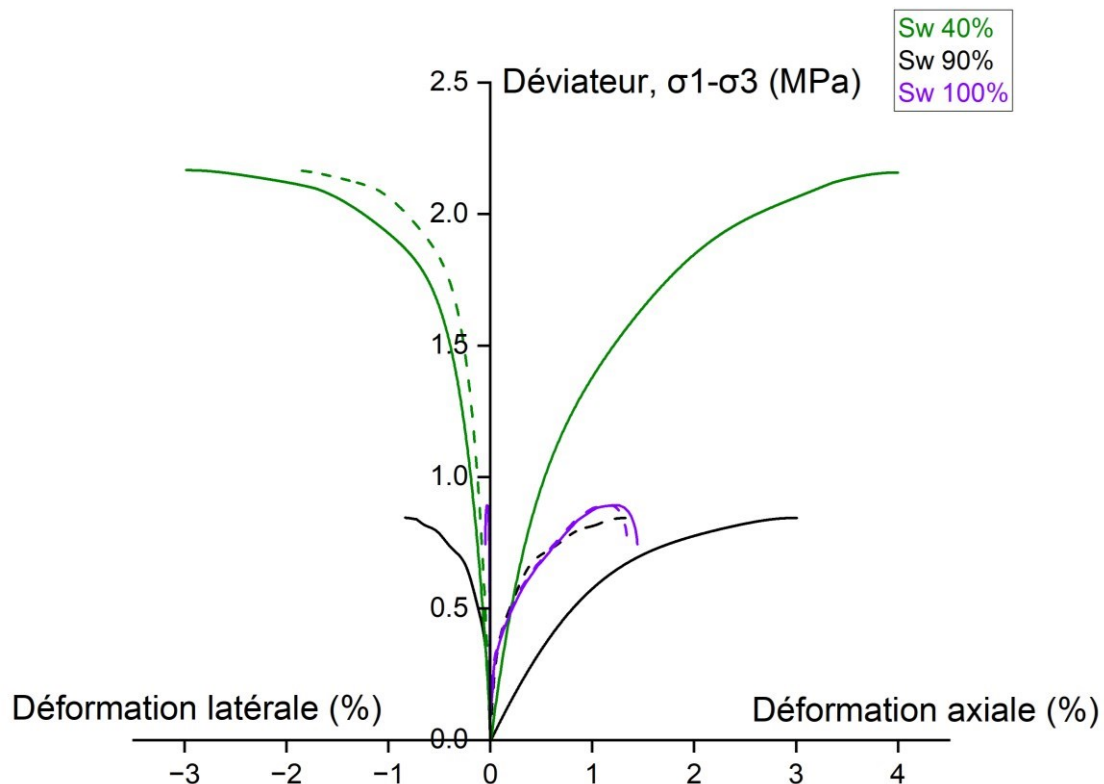


Figure 3.11 Essai triaxial drainé à différents degrés de saturation et un confinement de 0.5 MPa : déformations volumiques en pointillées (Pajiep et al. 2024)

Les courbes illustrent la diminution de la résistance de la craie avec l'augmentation du degré de saturation en eau. À $S_w = 100\%$, on observe une réponse non linéaire fragile, marquée par un pic de contrainte distinct mais aucune rupture ne s'est produite au cours de l'essai. En revanche, un comportement ductile est observé à $S_w = 40\%$ et 90% , la comportement de la craie est ductile caractérisé par une déformation continue. Les résultats montrent également que l'évolution de la déformation volumique dépend de l'état de saturation de l'échantillon.

3.5.4.2. Influence de la pression de confinement à saturation

Les figures 3.12 à 3.14 présentent l'évolution du comportement de la craie de Château-Landon pour les 5 pressions de confinement (3 MPa ; 2 MPa ; 1,5 MPa ; 1 MPa ; 0,5 MPa) réalisées sur échantillons complètement saturés ($S_w = 100\%$).

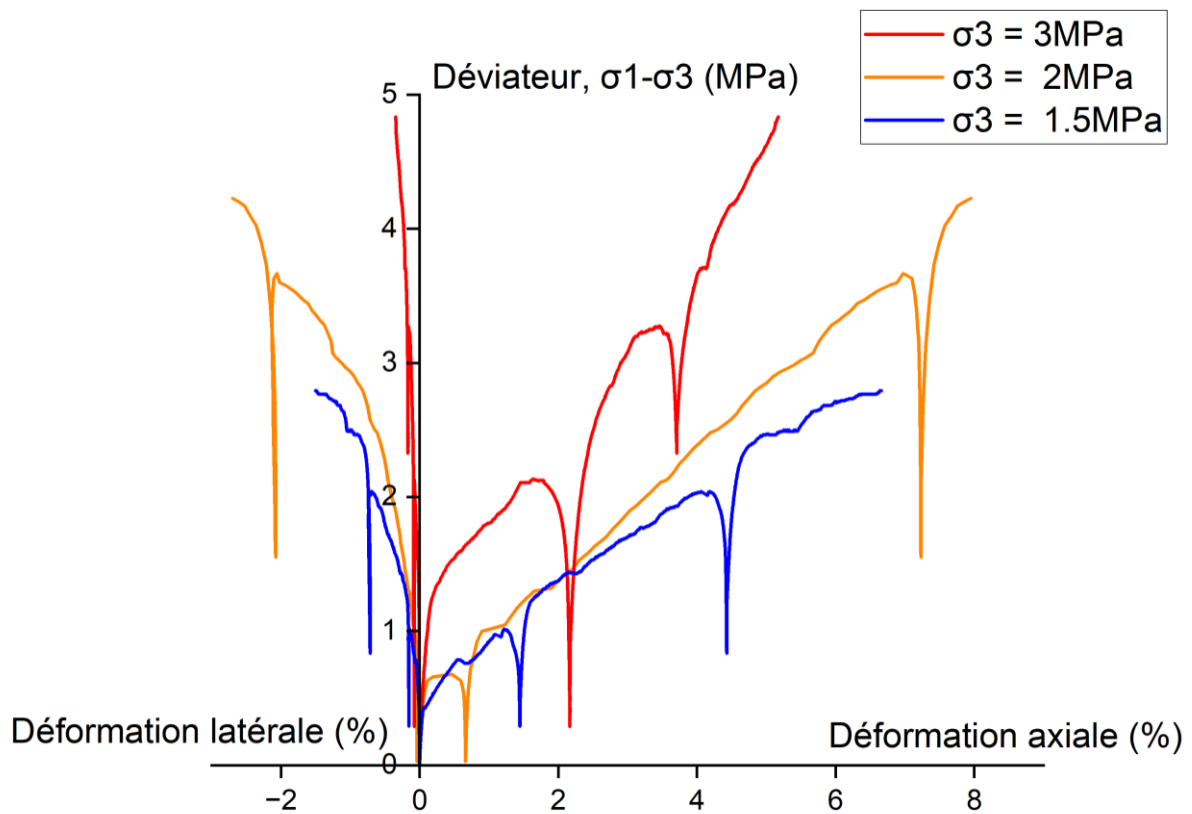


Figure 3.12 Essais triaxiaux drainés à différentes pressions de confinement ($S_w = 100\%$) (Pajiep et al. 2024)

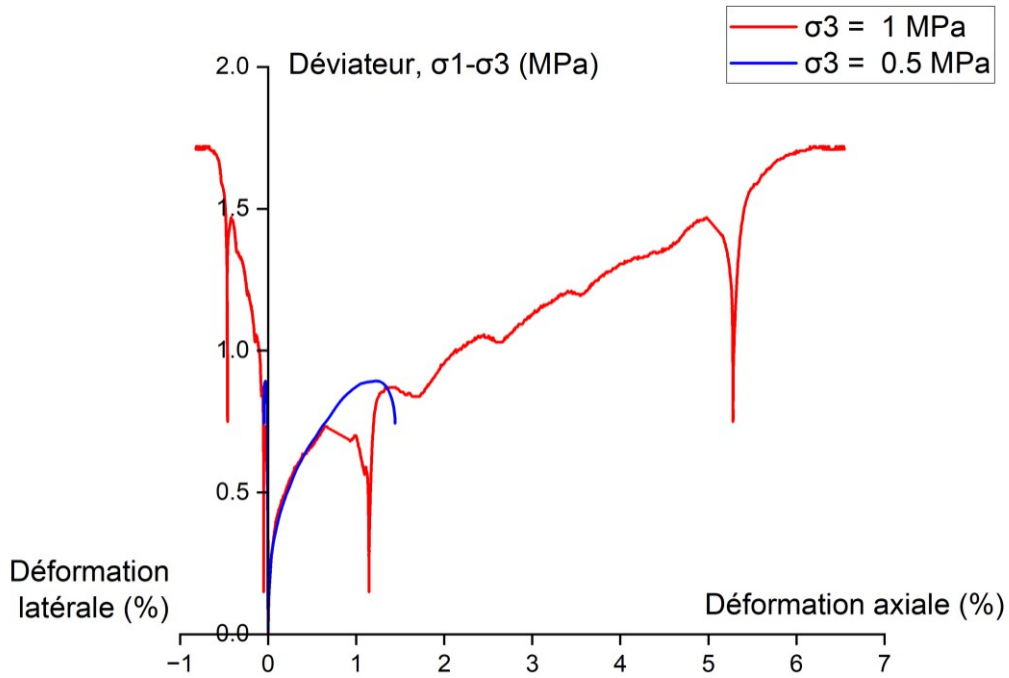


Figure 3.13 Essais triaxiaux drainés à différentes pressions de confinement ($S_w = 100\%$) (Pajiep et al. 2024)

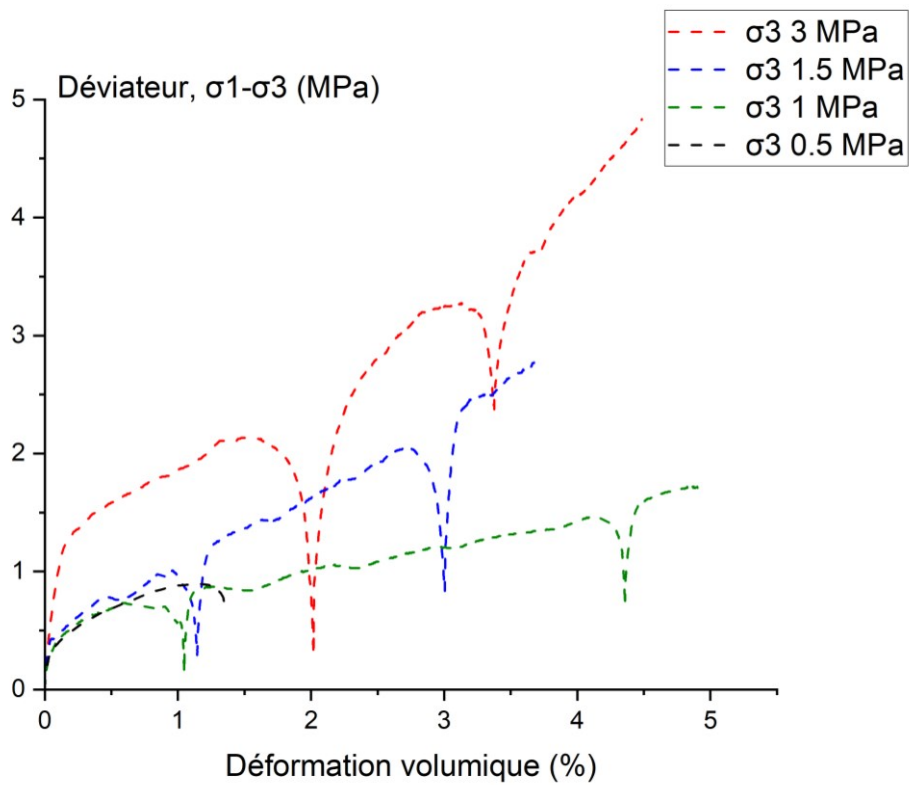


Figure 3.14 Evolution des déformations volumiques à différentes pressions de confinement ($S_w = 100\%$) (Pajiep et al. 2024)

A partir de ces courbes, nous pouvons faire les remarques suivantes sur le comportement mécanique de la craie de Château Landon à un état totalement saturé ($S_w = 100\%$) :

- Pour l'essai à la pression de confinement de 0,5 MPa, un comportement de type élastoplastique fragile est observé. Aucune rupture de l'échantillon ne s'est produite mais un pic peut être observé à 0,9 MPa de déviateur.
- Pour les essais aux pressions de confinement respectives de 1 ; 1,5 ; 2 et 3 MPa, un comportement de type élastoplastique ductile est observé. La linéarité initiale désigne alors la phase élastique suivi d'une grande phase de déformations plastiques.
- Les déformations latérales sont très faibles par rapport aux déformations axiales pour tous les essais, entraînant de fait un comportement volumique contractant.
- Globalement, les déformations axiales diminuent avec l'augmentation de la pression de confinement à un état de saturation totale de l'échantillon.
- La résistance de l'échantillon diminue avec l'augmentation de la pression de confinement : ce qui est conforme au comportement des géomatériaux
- Aucune rupture n'est observée même pour de grandes déformations allant jusqu'à 8%.

3.5.5. Essais de fluage

Afin d'étudier la stabilité à long terme des ouvrages, il est important de comprendre son comportement à long terme en identifiant la déformation de la roche en fonction du temps. Comme présenté dans le chapitre précédent, Lafrance (2016) a réalisé des essais de fluage uniaxiaux sur cette craie mais les résultats n'ont pas été concluants soulevant des questions sur l'approche uniaxiale. Par conséquent, dans le cadre de cette thèse, nous avons délibérément choisi de réaliser des essais triaxiaux de fluage sur la craie de Château-Landon sous deux degrés de saturation en eau (40 % et 100 %) et une pression de confinement de 1 MPa.

Les essais de fluage ont été réalisés en deux étapes en conditions drainées. Une première phase qui consiste à appliquer à l'échantillon un champ de contraintes hydrostatiques et les maintenir constantes. Une deuxième phase qui consiste ensuite à imposer un déviateur préalablement choisi tout en gardant les contraintes de confinement constantes, la mise en charge reste suffisamment lente pour assurer un drainage simultané de l'échantillon. En maintenant toutes les contraintes à des valeurs constantes, les déformations axiales et radiales sont mesurées en fonction du temps à l'aide de deux capteurs LVDT axiaux et du collier.

Ainsi, nous avons réalisé deux essais de fluage pour une pression de confinement de 1 MPa de confinement et un déviateur de 1 MPa sous les degrés de saturation suivants $S_w = 40\%$ et 100% . Les résultats sont présentés sur la figure 3.15.

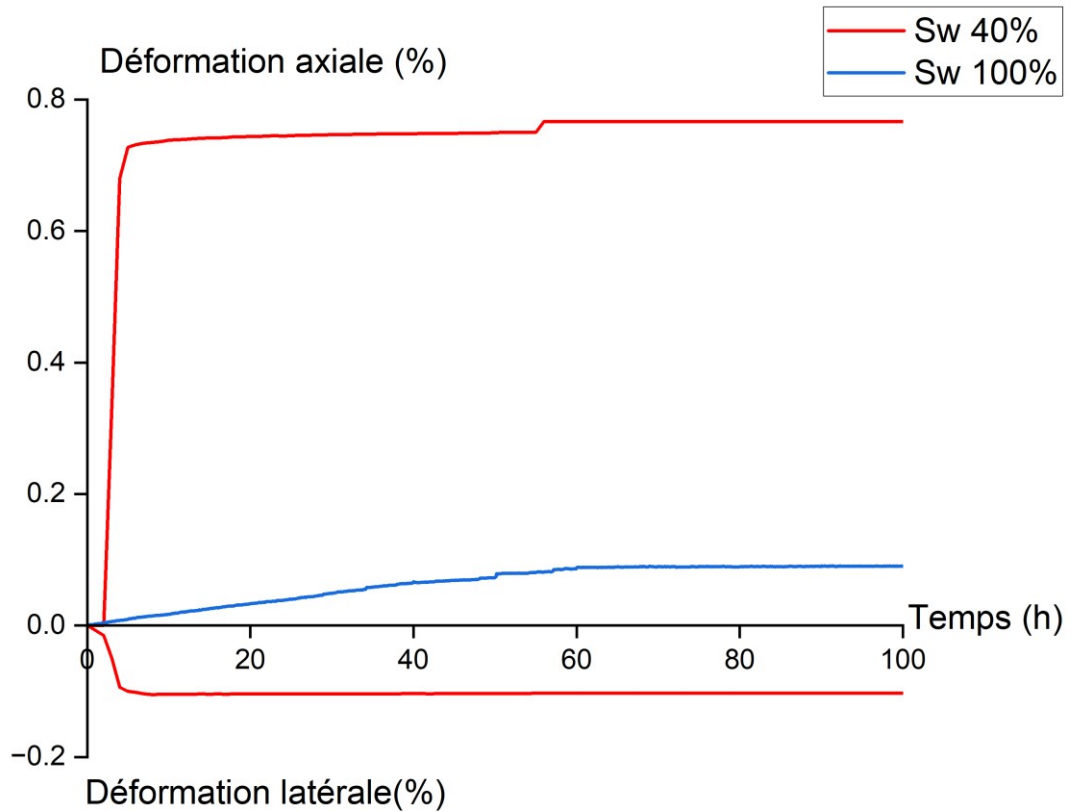


Figure 3.15 Essais de fluage sous deux degrés de saturation 40% et 100% (Pajiep et al. 2024)

A partir de ces courbes les remarques peuvent être faites :

- Seul la phase transitoire (fluage primaire) est observée
- Les déformations dues au fluage sont essentiellement plastiques
- Une stabilisation des déformations est observée à des temps différents : après 10 heures pour $S_w = 40\%$ et après 60 heures pour $S_w = 100\%$)
- Des variations de déformation plus importantes sont obtenues pour un degré de saturation en eau de 40% par rapport à celui de 100%.

3.5.6. Discussion

Dans ce travail, plusieurs essais ont été réalisés à différents degrés de saturation et pression de confinement. Les résultats obtenus ont mis en évidence le mécanisme de « pore collapse » de la craie et l'effet du degré de saturation.

Le comportement hydrostatique de la craie a fait l'objet de plusieurs travaux au cours des dernières années (Dahou 1995, Homand 2000, Schroeder 2002, Collin et al. 2002, De Gennaro et al. 2003, 2004, Priol 2005, Xie 2005, Nguyen 2009, Lafrance 2016). De façon générale, la phase « pore collapse » est identifiée. Les mécanismes physiques associés à l'effet de l'eau sont très complexes et dépendent de plusieurs facteurs (Risnes et al. 2005). L'influence du degré de saturation en eau peut être interprétée comme la conséquence de la destruction des forces capillaires et de la dissolution sous pression des contacts cimentés entre les grains. La résistance mécanique de ce matériau peut être liée à deux forces de contact : la force de contact liquide due à la succion capillaire et la force de contact solide due à la cimentation entre les grains. Le changement de la teneur en eau modifie ces forces de contact et conduit alors à une diminution drastique du seuil de plasticité initial de la craie, comme le montre la figure 3.16. Comme pour les sols non saturés, l'étude de l'influence de la saturation sur les paramètres de compressibilité (élastique, plastique) de la craie est très importante. Les figures 3.16 et 3.17 présentent les paramètres élastiques et plastiques déterminés pour les essais hydrostatiques à différents degrés de saturation.

Les résultats observés sur la figure 3.16 indiquent une réduction de la seuil de plasticité initial avec l'augmentation de la saturation en eau, révélant l'influence significative de saturation sur le comportement mécanique de cette craie. La diminution observée entre 40% et 60% de saturation suggère une phase de transition critique dans la réponse du matériau qui peut être associée à l'effondrement de structures faibles ou peu liées dans la matrice de la craie au fur et à mesure que la saturation en eau augmente. En outre, la faible variation entre 60 % et 100 % indique un seuil de saturation au-delà duquel la résistance de la craie se stabilise. Lafrance (2016) a également réalisé un essai durant sa thèse sur la craie de Château Landon à l'état complètement sec. La limite de pore collapse est légèrement inférieure à celle que nous avons obtenue sur un échantillon saturé à 10 %.

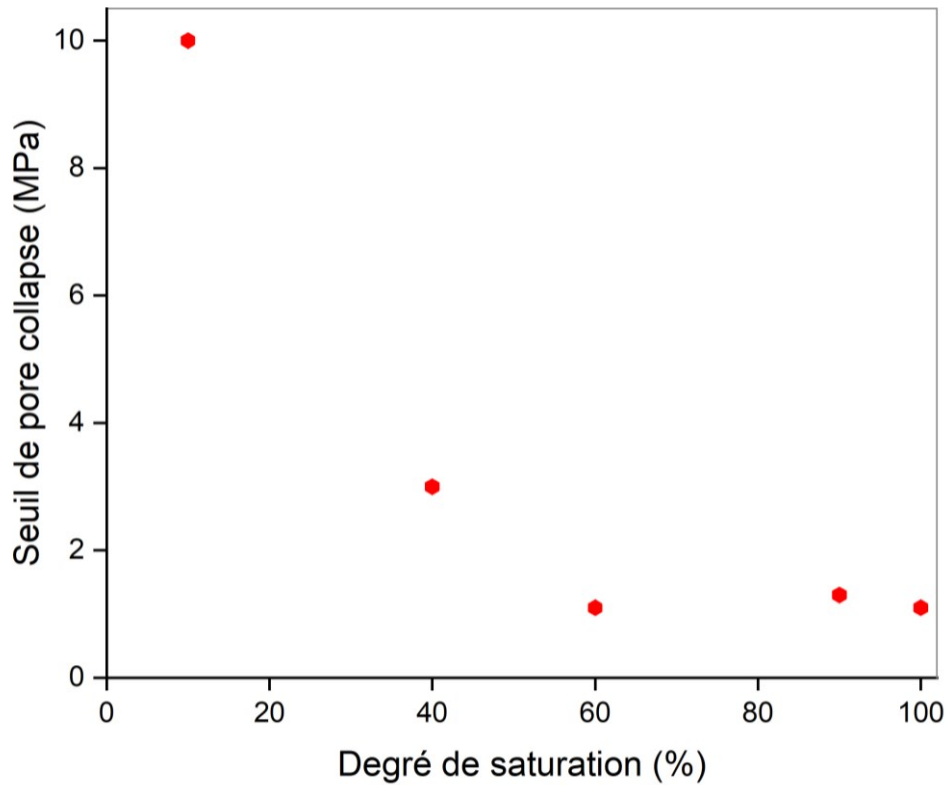


Figure 3.16 Evolution du seuil de plasticité initial avec le degré de saturation en compression hydrostatique (Pajiep et al. 2024)

La figure 3.17 quant à elle présente l'influence du degré de saturation en eau sur le module de compressibilité calculé comme suit :

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon_v} \quad (3.3)$$

où ε_v représente la déformation volumique et P la contrainte hydrostatique.

Une diminution du module de compressibilité sous humidification a été observée pour la craie de Lixhe (Priol 2005), la craie d'Estreux (Nguyen, 2009) mais aussi pour les argiles gonflantes compactées (Marcial 2004, Tang 2005). Les résultats confirment une diminution de la rigidité (module de compressibilité) avec la saturation. Les grains sous l'humidification peuvent s'écarter et affaiblir la cimentation, leurs contacts et leur structure devient donc moins rigide. Cependant, on note une forte réduction entre 10 et 40 % de saturation suggérant une altération de la rigidité de la craie dans cette plage de saturation.

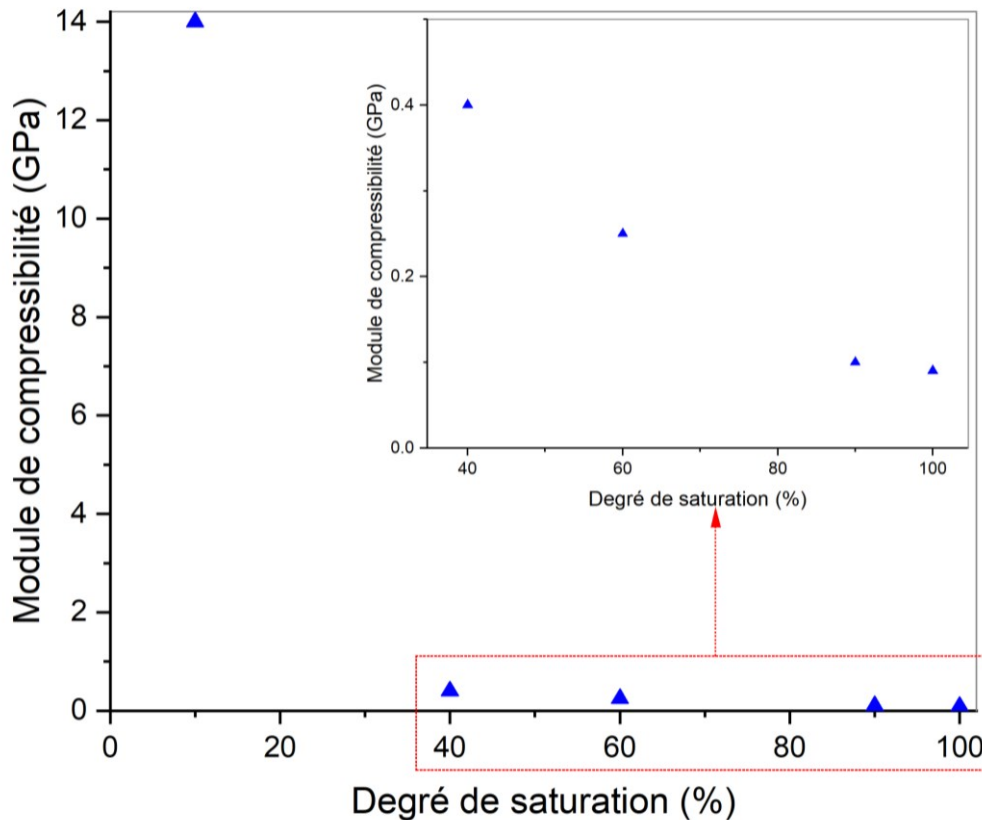


Figure 3.17 Evolution du module de compressibilité avec le degré de saturation en compression hydrostatique (Pajiep et al. 2024)

Le comportement déviatorique, dépendant de la contrainte de confinement a également fait l'objet de plusieurs études (Siwak et al. 1994, Dahou et Henry 1995, Collin et al. 2002, Xie 2005, Nguyen 2009, Lafrance 2016, Geremia et al. 2021, Kibikas et al. 2023, Doré-Ossipyan et al. 2023). Dans cette étude, un comportement élastoplastique fragile est observé uniquement à 0.5 MPa sans rupture de l'échantillon à un état totalement saturé de l'échantillon (Figures 3.11 et 3.13). Il est à noter que cet essai a été réalisé à plusieurs reprises pour confirmer le résultat et s'affranchir de biais en lien avec les difficultés expérimentales rencontrées du fait du faible confinement appliqué. Le même comportement a été observé à chaque essai. À des niveaux de confinement plus élevés, on observe un comportement ductile ne conduisant pas à une rupture à l'échelle macroscopique. Ce changement de comportement est étroitement lié à la forte porosité de la craie (Homand et Shao 2000). Lorsque le déviateur dépasse la limite élastique, la structure de la craie subit une rupture en chaîne. Une pression élevée permet de réduire la déformation latérale tout en augmentant la surface de contacts entre les grains. Ce

phénomène équivaut à un renforcement du matériau, et un écrouissage se manifeste jusqu'à la déstructuration complète de la craie (Nguyen 2009).

A partir des essais triaxiaux à saturation totale, le module de Young élastique et le coefficient de Poisson ont également été calculés et présentés à la figure 3.18. Le module de Young montre une légère diminution au fur et à mesure que la pression de confinement augmente et le coefficient de Poisson présente un comportement isotrope. La légère diminution du module d'Young suggère une sensibilité de la rigidité de la craie à la pression appliquée, tandis que les valeurs relativement stables du coefficient de Poisson suggèrent une déformation volumique minimale malgré les variations de la pression de confinement.

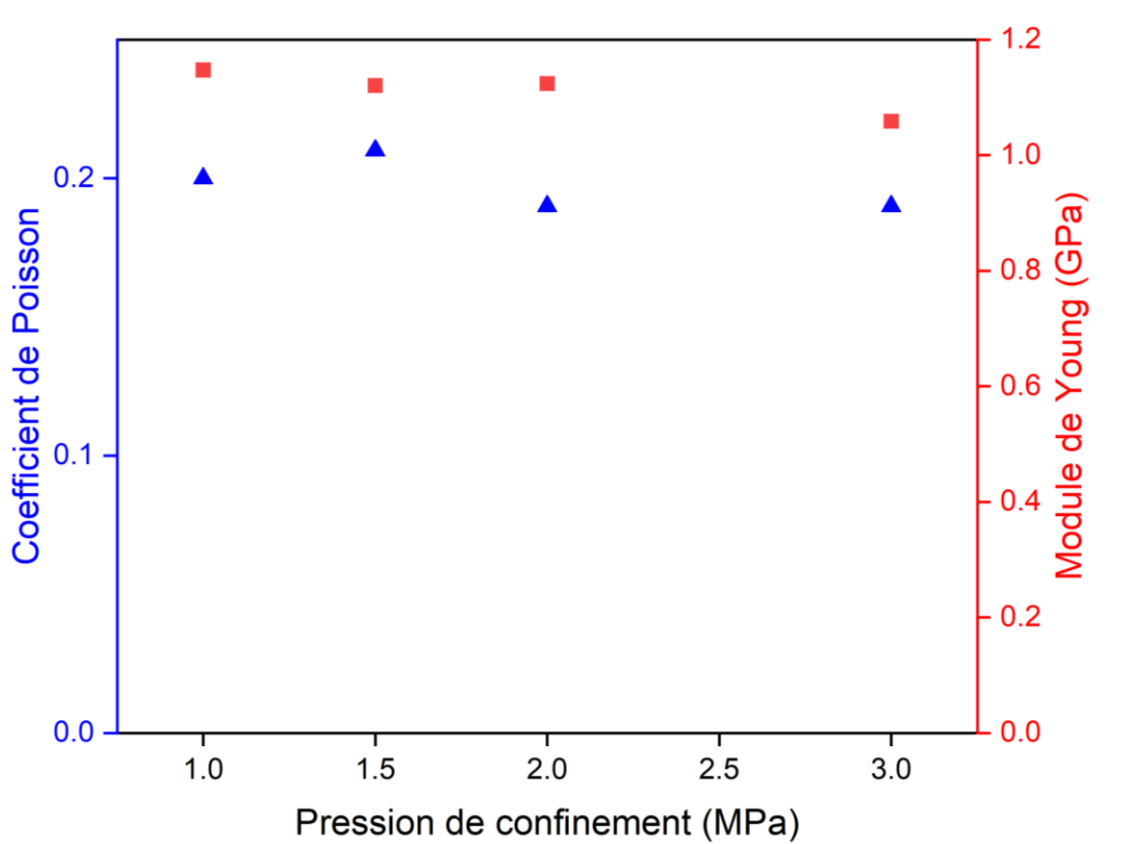


Figure 3.18 Influence de la pression de confinement sur les propriétés élastiques ($S_w=100\%$) (Pajiep et al. 2024)

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une campagne d'essais sur la craie de Château-Landon. Différents types d'essais ont été réalisés à savoir des essais à court terme (essais hydrostatiques et triaxiaux) et des essais à long terme (essais de fluage). Un mécanisme d'effondrement des pores (pore collapse) a été observé sous chargement hydrostatique sous différents niveaux de saturation en conformité avec les observations faites sur d'autres craies comme celles de Lezennes (Dahou 1995), de Lixhe (Priol 2005) ou encore Estreux (Nguyen 2009). La craie de Château-Landon a un comportement essentiellement ductile aux états saturés et non saturés, un comportement élastoplastique fragile a néanmoins été observé pour un état totalement saturé et une faible pression de confinement de 0,5 MPa. Le peu d'essais de fluage réalisés ne permet pas de tirer une conclusion sur le comportement à long terme de ce matériau, toutefois on note très peu de déformations différées et aucune rupture quel que soit le degré de saturation comme observé par Xie (2005) sur la craie de Lixhe. Nos essais ont permis de montrer que le degré de saturation a une influence sur le seuil de plasticité de la craie mais aussi sur ses propriétés élastiques. L'ensemble des résultats ont permis d'avoir une connaissance plus approfondie sur le comportement mécanique de cette craie et ont contribué au choix du modèle qui est présenté au chapitre suivant.

Chapitre 4 : Modélisation du comportement de la craie de Château-Landon

Tables des matières

4.1.	Introduction.....	87
4.2.	Choix de l'approche pour un modèle de comportement pour la craie de Château Landon	87
4.3.	Formulation du modèle basé sur la micromécanique	89
4.4.	Illustration du modèle et analyse de sensibilité de quelques paramètres.....	97
4.5.	Identification des paramètres du modèle	99
4.6.	Simulation des essais de laboratoire pour un état totalement saturé de la craie de Château-Landon ($S_w=100\%$).....	101
4.7.	Prise en compte de la saturation dans le modèle	103
4.8.	Conclusion	106

4.1. Introduction

Le chapitre précédent a présenté l'étude du comportement mécanique de la craie de Château-Landon à travers une série d'essais hydrostatiques, triaxiaux et de fluage, confirmant l'impact de la saturation sur le comportement global de ce matériau. Ces investigations ont souligné la nécessité de considérer de manière adéquate la saturation dans les modèles destinés à appréhender le comportement complexe de la craie. Ce dernier chapitre présente le modèle que nous avons retenu qui est basé sur la micromécanique pour représenter ce comportement et qui a été modifié afin de prendre en compte la saturation. Ce chapitre s'attachera donc à exposer le modèle choisi et à présenter en détail sa formulation. L'élaboration de ce modèle implique une analyse détaillée des observations expérimentales, lesquelles jouent un rôle crucial dans la détermination des paramètres constitutifs du modèle. Une section est également consacrée à l'analyse de l'influence de divers paramètres sur les prédictions numériques du modèle. En dernier, les simulations sont confrontées aux résultats obtenus expérimentalement.

4.2. Choix de l'approche pour un modèle de comportement pour la craie de Château Landon

La plupart des géomatériaux présentent des microstructures complexes (pores, inclusions minérales, microfissures, etc.) qui induisent des comportements macroscopiques complexes. Leur réponse mécanique dépend directement de l'évolution de la microstructure du matériau, tels que l'évolution de la porosité, l'apparition et la croissance de microfissures, et les réactions physiques et chimiques.

De nombreuses études expérimentales ont été menées afin de comprendre leurs microstructures, leurs compositions chimiques, ainsi que leurs comportements à l'échelle macroscopique et microscopique. En parallèle aux études expérimentales ou comme leurs conséquences, les lois de comportement des géomatériaux sont élaborées selon deux approches distinctes. La première, dite phénoménologique se base sur les résultats d'essais et font généralement appel à des paramètres macroscopiques connus de l'Ingénieur autour du frottement et la cohésion. Plusieurs modèles constitutifs ont été développés à partir des principaux mécanismes observés qu'ils soient purement mécaniques ou couplés en conditions saturées et non saturées, avec ou sans prise en compte de la nature du fluide saturant (Homand et Shao 2000, Schroeder et al. 2000, , Xie et Shao 2006, Xie & Shao 2015, Nourani et al., 2020) (Cassiani et al., 2017) avec ou sans les déformations dépendantes du temps (fluage)

(Huang et al., 2014). Cette approche offre une simplicité avantageuse mais montre également des limites (par exemple elle ne prend pas en compte correctement les relations entre la microstructure et les comportements macroscopiques tels que la porosité et les compositions minéralogiques). Quelques exemples de modèles de cette famille basé sur l'élastoplasticité, la viscoplasticité et/ou visco-élastoplasticité, ont été discutés en largeur dans le chapitre 2.

La seconde approche quant à elle est basée sur la micromécanique. Elle permet une description plus précise du comportement macroscopique du matériau en s'appuyant sur des informations liées à la microstructure et sur la connaissance des comportements locaux des constituants à travers le processus d'homogénéisation. Plusieurs modèles micromécaniques ont été développés au cours des dernières décennies avec différentes techniques d'homogénéisation pour les roches poreuses ductiles. Ils combinent généralement l'analyse limite et l'homogénéisation de type Hill-Mandel telles qu'elles ont été amorcées dans les travaux pionniers de Gurson (Gurson 1977) sur les métaux poreux. Plusieurs développements ces dernières années ont porté sur des géomatériaux ductiles poreux dont la matrice est plastiquement dilatant (Hill 1951, Drucker et al. 1952, Salençon 1983, Guo et al. 2008), des géomatériaux poreux dont la matrice est de type Drucker-Prager non associé) et des milieux granulaires poreux (Maalej et al. 2009, Shen et al. 2012, He et al. 2013, Bignonnet et al. 2016). Dans le passé, cette famille de modèles a été peu utilisée ou restreinte à des applications à petite échelle en raison du temps nécessaire à leur mise en œuvre numérique. Cependant, les progrès réalisés dans les algorithmes d'homogénéisation et la puissance accrue des calculateurs ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses pour des applications pratiques des modèles micromécaniques.

De ce panel d'approches phénoménologiques et micromécaniques, nous avons fait le pari sur l'approche micromécanique pour 2 raisons :

- tout d'abord, elle offre une meilleure représentation du comportement macroscopique en tenant compte des caractéristiques intrinsèques de la microstructure, permettant ainsi une compréhension des interactions à l'échelle locale. Par exemple, l'introduction de la porosité de manière explicite comme variable d'état permet d'une part de lier facilement le comportement macroscopique à celui de la microstructure, donc son effondrement.

- de plus, cette approche s'avère particulièrement adaptée pour modéliser les réponses dans des contextes non linéaires, où la linéarisation des lois constitutives locales devient souvent insuffisante pour décrire de manière précise les phénomènes complexes de couplage (prise en compte de l'endommagement qui n'est pas forcément celui d'initiation, propagation et coalescence des fissures).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes appuyés sur des travaux réalisés au sein de l'équipe du LaMcube depuis plusieurs décennies sur la rhéologie des géomatériaux poreux (Shao et al. 2006, Shen et al. 2015, Zeng et al. 2015, Zhang et al. 2017, Cao et al. 2018). Une attention particulière a été portée ici sur l'un des modèles basés sur la micromécanique développé par Shen et Shao (2018).

4.3. Formulation du modèle basé sur la micromécanique

4.3.1. Microstructure et propriétés élastiques effectives

Comme présenté au deuxième chapitre, la microstructure des craies est très complexe composée de grains de calcite reliés par différentes surfaces de contact et de pores. Par conséquent, les propriétés mécaniques macroscopiques des roches poreuses sont analysées ici selon deux approches. Après une première phase d'homogénéisation, les grains solides et les différents contacts forment une matrice solide équivalente dont le comportement mécanique dépendra essentiellement des propriétés de contacts. Les pores fermés alors (la porosité occluse) sont considérés comme faisant partie de la matrice solide. Tandis que les pores connectés constituent la porosité macroscopique définie par la variable ϕ . Ainsi le comportement mécanique de la craie sera alors caractérisé par celui de sa matrice équivalente et de la porosité macroscopique. Une schématisation de cette représentation est présentée à la figure 4.1.

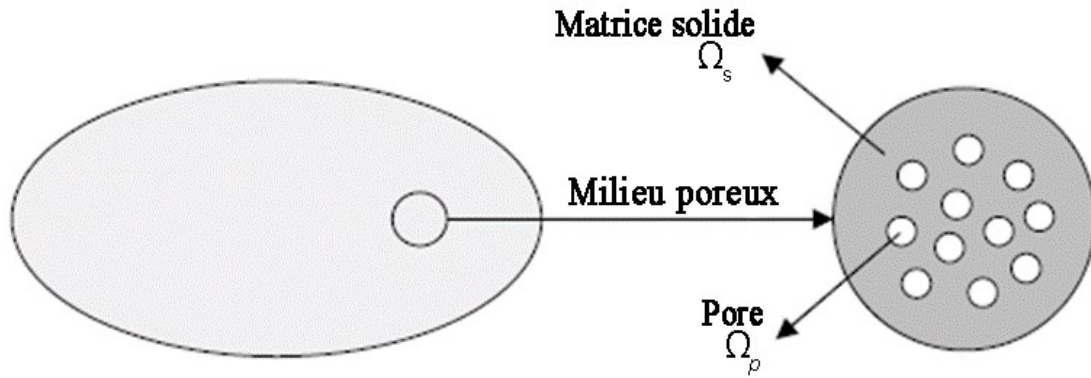


Figure 4.1. Schématisation du milieu poreux (Chao et al. 2022)

En considérant la matériau comme isotrope et sur la base de l'homogénéisation de Mori-Tanaka (1973) pour les matériaux poreux, les propriétés élastiques macroscopiques sont données par les relations suivantes :

$$k_{\text{hom}} = \frac{4(1 - \phi)k_m\mu_m}{4\mu_m + 3\phi k_m} ; \mu_{\text{hom}} = \frac{(1 - \phi)\mu_m}{1 + 6\phi \frac{k_m + 2\mu_m}{9k_m + 8\mu_m}} \quad (4.1)$$

Où $(k_{\text{hom}}; \mu_{\text{hom}})$ représentent les modules de compressibilité et de cisaillement du milieu équivalent homogénéisé ; $(k_m; \mu_m)$ les modules de compressibilité et de cisaillement de la matrice solide et ϕ la porosité macroscopique.

4.3.2. Critère de plasticité

Le critère de Gurson (Gurson, 1977) et ses nombreuses extensions sont aujourd'hui largement utilisés pour étudier le comportement des matériaux poreux ductiles. Afin de déterminer la surface de plasticité macroscopique qui suffit en pratique pour formuler la loi de comportement, une approche cinématique (dite de l'extérieur) est appliquée sur une cellule (Ω) sous la forme d'une sphère creuse de rayon interne a et de rayon externe b dont la matrice solide est de type rigide plastique (Figure 4.2).

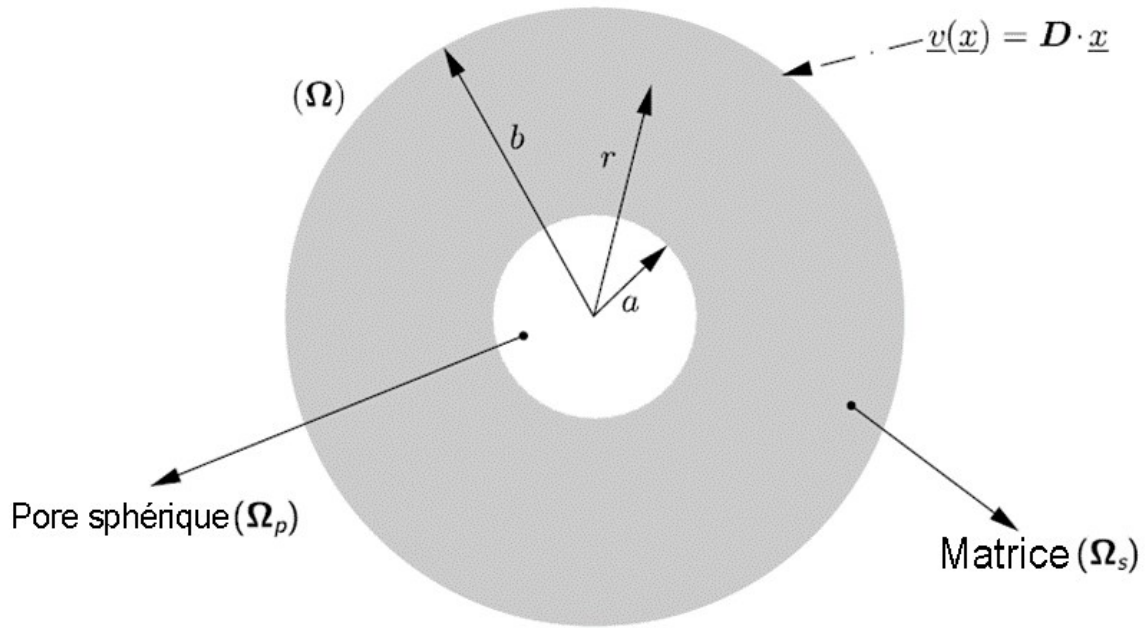


Figure 4.2 Cellule de sphère creuse avec des conditions limites de vitesse de déformation uniforme (Kondo, 2019)

Le volume total de la cellule est $\Omega = \frac{4\pi b^3}{3}$ tandis que le volume total des vides est $\Omega_p = \frac{4\pi a^3}{3}$.

La porosité déduite obtenue est alors :

$$\phi = \frac{\Omega_p}{\Omega} = \frac{a^3}{b^3} \quad (4.2)$$

La matrice solide Ω_s considérée incompressible et isotrope quant à elle obéit au critère de Mises-Schleicher (Schleicher, 1926) suivant :

$$\varphi(\sigma) = \sigma_{eq}^2 + 3\alpha\sigma_0\sigma_m - \sigma_0^2 \leq 0 \quad (4.3)$$

$\sigma_m = \text{tr}(\sigma)/3$ et $\sigma_{eq} = \sqrt{3/2 \sigma_d : \sigma_d}$ avec $\sigma_d = \sigma - \sigma_m I$ désignent respectivement les contraintes moyenne et équivalente de von Mises dans le champ de contrainte local de la matrice solide tandis que α et σ_0 sont des paramètres mécaniques associés aux limites d'élasticité en traction T et compression C donnés par :

$$\alpha = \frac{C - T}{\sigma_0}, \quad \sigma_0 = \sqrt{CT} \quad (4.4)$$

La sphère creuse est soumise à des conditions de taux de déformation homogène au bord :

$$\underline{v}(r = b) = D \cdot \underline{x} \quad (4.5)$$

Dans lequel D représente le tenseur des taux de déformation macroscopique imposé.

L'ensemble des champs de vitesse \underline{v} (auquel est associé le champ des taux de déformation $d(\underline{x})$) est cinématiquement admissible. Par application à la cellule poreuse de l'approche cinématique d'analyse limite et en s'appuyant sur le lemme de Hill-Mandel (Hill 1951), les états de contraintes macroscopiques admissibles sont tels que pour tout tenseur de taux de déformation macroscopique D :

$$\Pi : D \leq \Lambda(D) = \inf_{\underline{v} \in (C.A)} \left[\frac{1}{|\Omega|} \int \Delta(d) dV \right] \quad (4.6)$$

Dans lequel $\Lambda(D)$ et $\Delta(d)$ représentent respectivement les dissipations macroscopique et locale.

Il vient alors que :

$$\Pi = \frac{\partial \Lambda(D)}{\partial D} \quad (4.7)$$

A partir d'une loi de normalité à l'échelle macroscopique, résultat issu d'une homogénéisation non-linéaire, la fonction de charge macroscopique du matériau poreux obtenue est la suivante :

$$\Pi(\Sigma, \phi, \alpha, \bar{\sigma}) = \frac{\frac{\Sigma_{eq}^2}{\bar{\sigma}^2}}{B - 3\alpha \frac{B}{(1-\phi)\bar{\sigma}} \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}}} + 2\Gamma \cosh(A \ln(1 - 3\alpha \frac{\Sigma_m}{\bar{\sigma}})) - 1 - \Gamma^2 = 0 \quad (4.8)$$

Avec :

$$\begin{cases} A = \text{sign}(\Sigma_m) \frac{8 + \alpha^2 W^2(\phi p) + 2\alpha^2 W(\phi p)}{18\alpha} \\ \Gamma = [\alpha^2 W^2(\phi p) + 2\alpha^2 W(\phi p)]^A \\ B = \left(\frac{1 - \phi}{1 - \Gamma} \right)^2 \end{cases} \quad (4.9)$$

Dans les 2 équations ci-dessus, $\Sigma_m = \text{tr}(\Sigma)/3$ représente la contrainte moyenne macroscopique, $\Sigma_{eq} = \sqrt{3/2 \Sigma_d : \Sigma_d}$ la contrainte déviatorique macroscopique, ϕ la porosité macroscopique.

W désigne la fonction "Lambert W " qui est définie par la fonction $W(x)e^{W(x)} = x$. Cette fonction n'est pas injective et est à double valeur sur l'intervalle $[-1/e, 0]$. On distingue deux branches de la fonction de Lambert W . La branche supérieure, notée $W_0(x)$ correspondant à $W(x) \geq -1$ pour $x \geq -1/e$ tandis que $W_{-1}(x)$ désigne la branche inférieure, correspondant à $W(x) \leq -1$ pour $-1/e \leq x \leq 0$. Sur la figure 4.3 sont représentées les deux branches de la fonction W de Lambert.

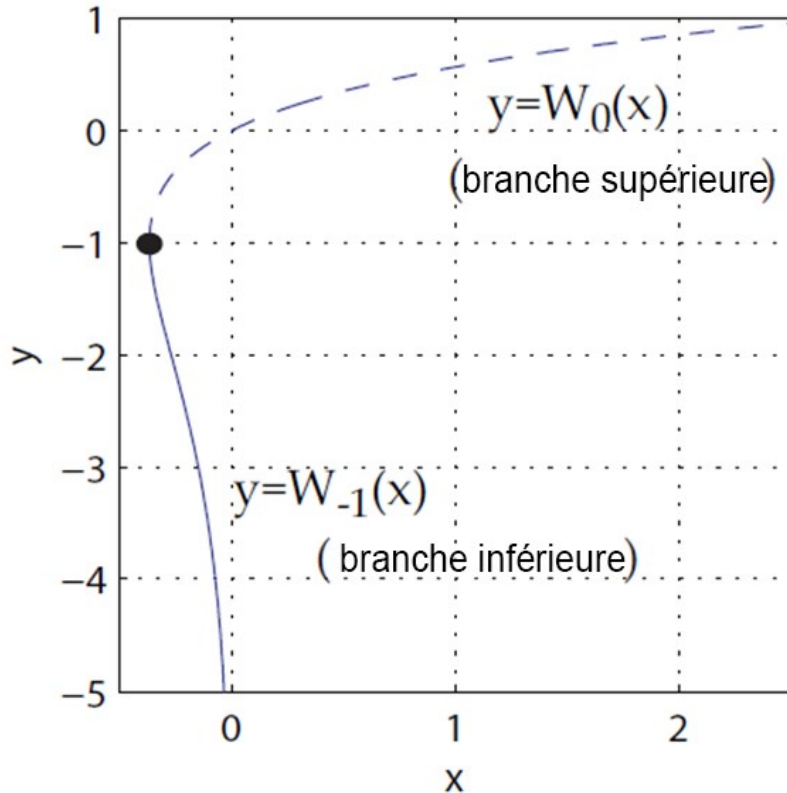


Figure 4.3 Les deux branches de la fonction W de Lambert, $y = W_0(x)$ et $y = W_{-1}(x)$ (Monchiet et Kondo 2012)

$W(\phi p) = W_{-1}(\phi p_-)$ est utilisé en compression et $W(\phi p) = W_0(\phi p_+)$ utilisé en traction. Les coefficients p_+ et p_- s'expriment par :

$$\begin{cases} p_+ = z_+ \exp(z_+), z_+ = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 1}}{\alpha} \\ p_- = z_- \exp(z_-), z_- = \frac{-\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 1}}{\alpha} \end{cases} \quad (4.10)$$

Les variations de p_+ et p_- en fonction de α sont représentées sur la figure 4.4. On observe que le coefficient p_+ est positif et tend vers zéro lorsque α tend vers $+\infty$ alors que p_- est négatif et tend vers la valeur finie $z_- = -2e^2$ lorsque α tend vers $+\infty$.

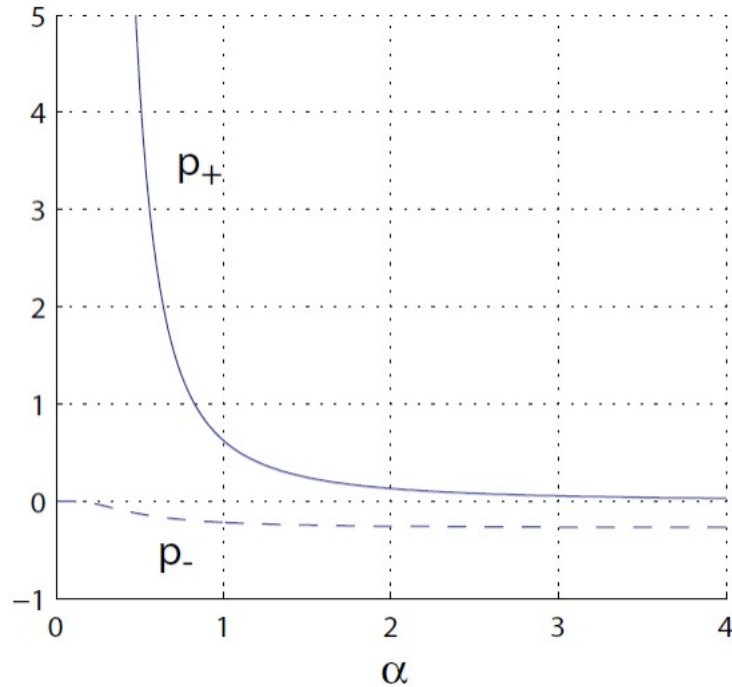


Figure 4.4 Représentation des coefficients p en fonction de α (Monchiet et Kondo, 2012)

4.3.3. Loi d'érouissage

La fonction $\bar{\sigma}$ décrit l'érouissage isotrope du matériau à travers l'évolution du seuil de plasticité. C'est une grandeur associée à la déformation plastique équivalente ε_{eq}^p pour caractériser l'érouissage plastique de la matrice solide.

La loi d'érouissage suivante est proposée :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 (1 + a(\varepsilon_{eq}^p)^n e^{b\varepsilon_{eq}^p}) \quad (4.11)$$

σ_0 représente le seuil de plasticité initial à un état donné du matériau, ε_{eq}^p la déformation plastique équivalente de la matrice solide et les paramètres a , b et n sont des coefficients qui représentent la cinématique de l'érouissage plastique et qui peuvent être déterminés à partir des essais hydrostatiques.

4.3.4. Évolution de la porosité

L'évolution de la porosité est donnée par l'équation de conservation de la masse en mettant à profit l'incompressibilité de la matrice plastique à partir de la compatibilité cinématique :

$$d\phi = (1 - \phi)\text{tr}E^P - \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega_s} \text{tr}d\varepsilon^P d\Omega = (1 - \phi)(\text{tr}E^P - 3d\varepsilon_m^P) \quad (4.12)$$

E^P et ε^P représentent les déformations plastiques locales et macroscopiques, Ω le volume totale de la cellule et Ω_s le domaine de la matrice solide.

A partir de la fonction de charge locale $\varphi(\sigma)$ donnée par la relation (4.3), l'évolution de la déformation plastique moyenne locale ε_m^P suivante est obtenue :

$$d\varepsilon_m^P = \frac{\alpha\sigma}{2\sigma_{eq}} d\varepsilon_{eq}^P \quad (4.13)$$

À partir du principe de l'équivalence en énergie plastique, la relation entre les déformations plastiques locale et macroscopique est ainsi déterminée :

$$(1 - \phi)\sigma d\varepsilon^P = \Sigma : E^P \quad (4.14)$$

On déduit ainsi :

$$d\varepsilon_{eq}^P = \frac{\Sigma : E^P}{(1 - \phi) \left(\sigma^2 - \frac{3}{2} \bar{\alpha} \sigma_m \right)} \sqrt{\sigma^2 - 3\bar{\alpha}\sigma_m} \quad (4.15)$$

En remplaçant les relations 4.13 et 4.15 dans l'équation 4.12, on obtient l'évolution de la porosité :

$$d\phi = (1 - \phi) \left(\text{tr}E^P - 3\alpha \frac{\Sigma : E^P}{2(1 - \phi)\bar{\sigma} - 3\alpha\Sigma_m} \right) \quad (4.16)$$

4.3.5. Loi d'écoulement plastique

Une loi d'écoulement plastique associée (i.e. potentiel plastique identique à la fonction de charge macroscopique) est adoptée, définie par la règle de normalité :

$$E^P = \lambda \frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma} \quad (4.17)$$

Le multiplicateur plastique est ensuite déterminé par la condition classique de consistance plastique suivante :

$$d\Phi(\Sigma, \phi, \bar{\sigma}) = \frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma} : d\Sigma + \frac{\partial \Pi}{\partial \phi} : d\phi + \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{\sigma}} : d\bar{\sigma} = 0 \quad (4.18)$$

On obtient ainsi :

$$D\lambda = \frac{\frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma} : \mathbb{C} : dE}{\frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma} : \mathbb{C} : \frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma} - H^G} \quad (4.19)$$

et

$$H^G = \frac{\partial \Pi}{\partial \phi} \left[(1 - \phi) \frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma_m} - \frac{3}{2} \alpha \frac{\Sigma : \frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma}}{\sigma - \frac{3}{2} \alpha \frac{\Sigma_m}{1 - \phi}} \right] - \frac{\frac{\partial \Pi}{\partial \bar{\sigma}} \bar{\sigma}}{\bar{\sigma} \bar{\omega} \varepsilon_{eq} (1 - \phi) \left(\bar{\sigma}^2 - \frac{3}{2} \bar{\alpha} \frac{\Sigma_m}{1 - \phi} \right)} \frac{\Sigma : \frac{\partial \Pi}{\partial \Sigma}}{\bar{\sigma}^2 - 3 \bar{\alpha} \sigma \frac{\Sigma_m}{1 - \phi}}$$

4.4. Analyse de sensibilité du modèle

Le modèle décrit ci-dessus se traduit par un écrouissage de la surface de charge Π avec la porosité macroscopique. Trois des paramètres ϕ , σ_0 et α sont investigués pour étudier leur sensibilité au modèle. Les valeurs de référence des paramètres utilisés sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Valeurs des paramètres utilisés pour l'étude de la sensibilité du modèle

ϕ	σ_0 (MPa)	α
0,3	1	2

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 présentent les surfaces de charge macroscopiques initiales obtenues en faisant varier chacun de ces 3 paramètres. Ces surfaces de charge présentent toutes des formes elliptiques asymétriques. La figure 4.5 montre que la surface de charge initiale diminue avec l'augmentation de la porosité entraînant avec elle une réduction de la limite d'élasticité hydrostatique (seuil de pore collapse). Ceci signifie qu'une déformation plastique importante peut être produite sous compression hydrostatique, ce qui est généralement observé expérimentalement sur les craies à forte porosité (Homand & Shao 2000, Risnes 2001, Talesnick et Shehadeh 2007, Lafrance 2016). Les figures 4.6 et 4.7 quant à elle montrent l'influence des paramètres σ_0 et α sur les surfaces de charge. On note une augmentation de celles-ci avec ces deux paramètres et une diminution du seuil de traction avec α (Figure 4.7).

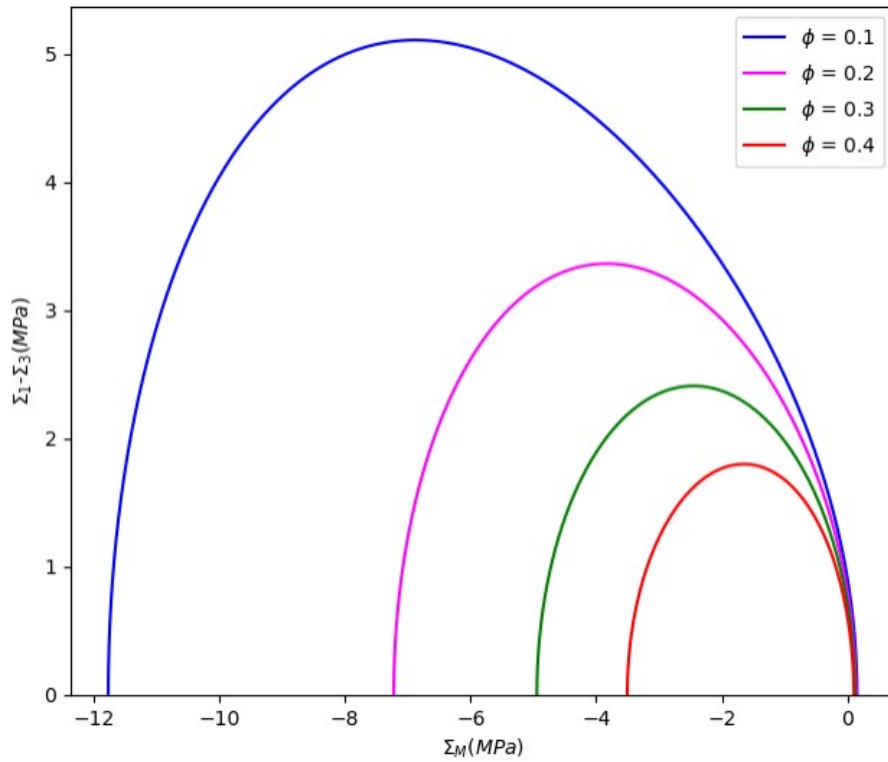


Figure 4.5 Effet de la porosité Φ sur la surface de charge macroscopique

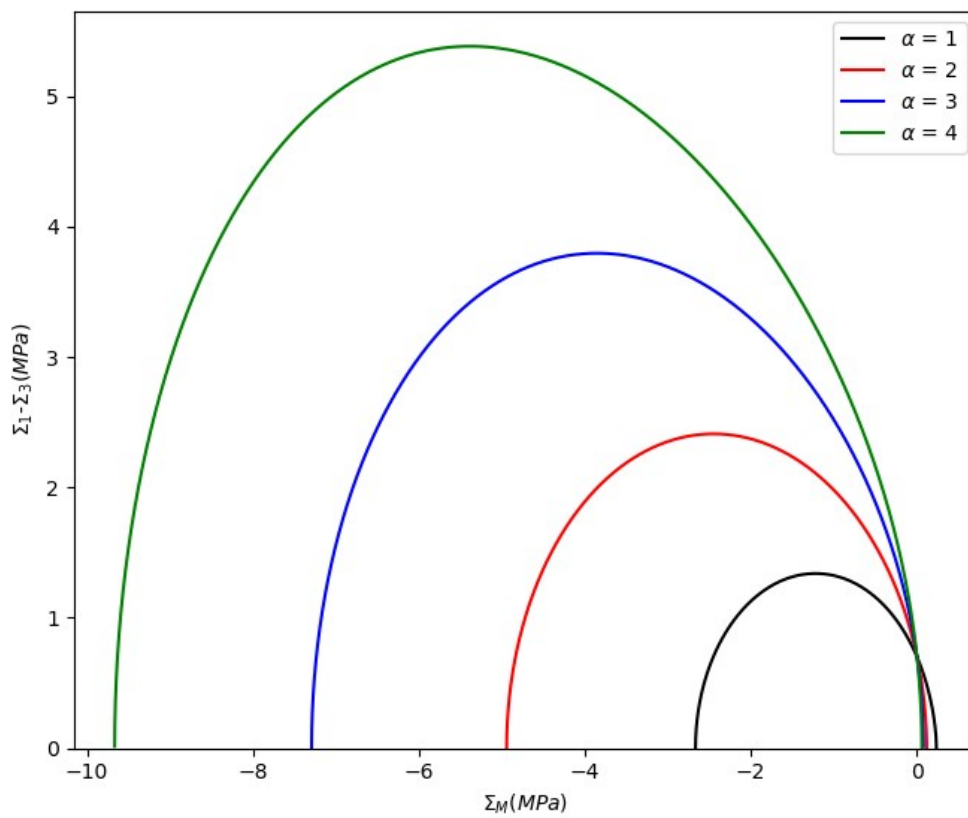
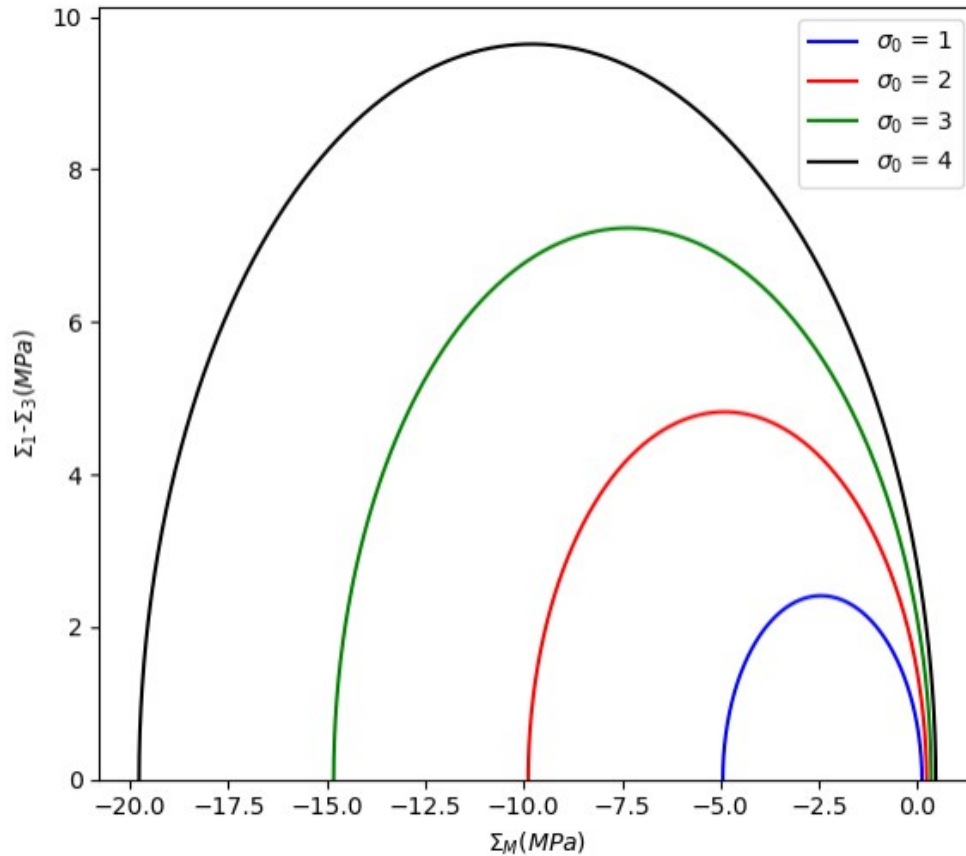


Figure 4.6 Effet du paramètre α sur la surface de charge macroscopique

Figure 4.7 Effet du paramètre σ_0 sur la surface de charge macroscopique

4.5. Identification des paramètres du modèle

Le modèle contient 8 paramètres pour décrire le comportement élastoplastique de la craie poreuse. Ces paramètres peuvent être déterminés à partir d'essais de laboratoire conventionnels. La porosité ϕ est un paramètre important du modèle, il est obtenu expérimentalement (voir chapitre 3). Les deux paramètres élastiques E_m et ν_m de la matrice solide sont déterminés à partir de la partie linéaire initiale de la courbe contrainte-déformation d'essais de compression triaxiale (k_{hom} , μ_{hom}) et de l'équation 4.1. Les deux paramètres plastiques α et σ_0 liés à la matrice solide peuvent être déterminés à partir des essais hydrostatiques et des essais déviatoriques purs qui sont souvent difficiles à mettre en œuvre. Néanmoins ils peuvent aussi être obtenus à partir de la surface de charge initiale et des limites obtenues à partir des essais triaxiaux et hydrostatiques et c'est la solution que nous avons retenue comme présenté sur la figure 4.8. Finalement les trois paramètres a , b et n de la loi d'érouissage sont obtenus à partir des essais hydrostatiques.

Tableau 4.2 Valeur des paramètres du modèle pour la craie de Château-Landon saturée à l'eau ($S_w = 100\%$)

Paramètres	Craie saturée à l'eau
Porosité, ϕ	0,44
Module de Young de la matrice solide, E_m (MPa)	2860
Coefficient de Poisson de la matrice solide, ν_m	0,18
Seuil plastique de pore collapse, σ_0 (MPa)	1,05
Paramètre lié à la surface de charge, α	0,5
Paramètre de l'écroutissage plastique, a	0,06
Paramètre de l'écroutissage plastique, b	0,15
Paramètre de l'écroutissage plastique, n	1,68

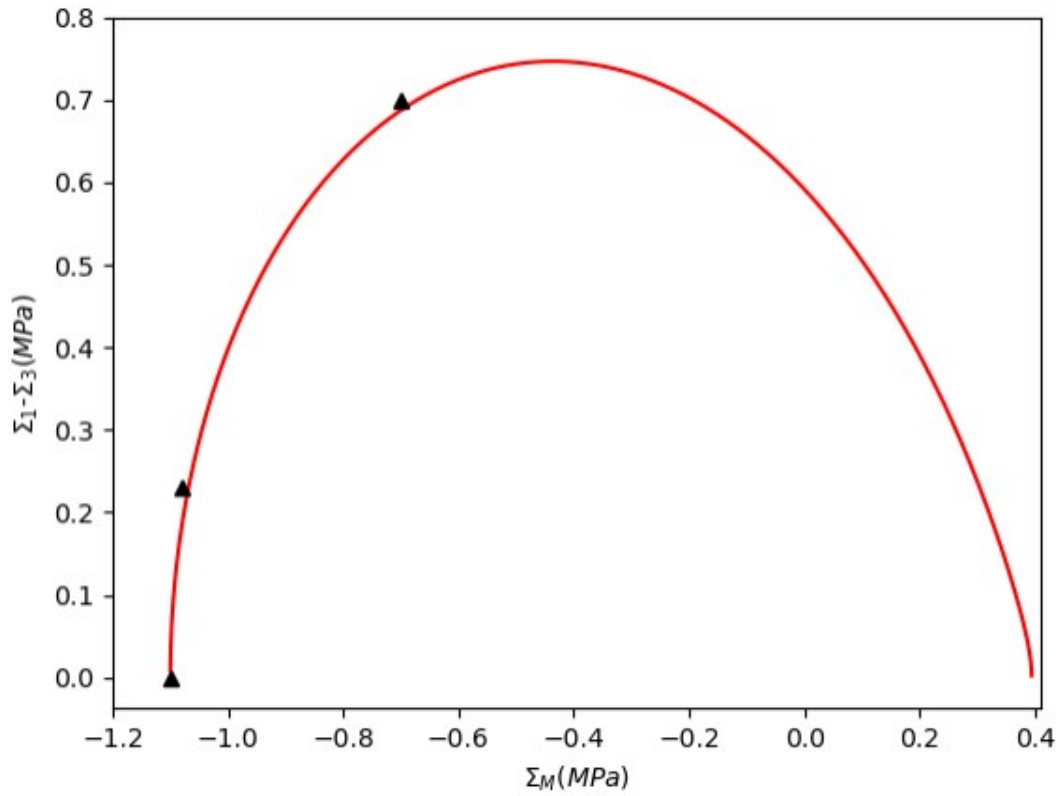


Figure 4.8 Surface de charge initiale de la craie de Château-Landon ($S_w = 100\%$)

4.6. Simulation des essais de laboratoire pour un état totalement saturé de la craie de Château-Landon ($S_w = 100\%$)

Afin de tester la capacité du modèle à décrire le comportement mécanique de base de la craie de Château-Landon sous sollicitations purement mécaniques, il convient de comparer les données expérimentales et les simulations numériques sur des chemins de chargement représentatifs. D'après les résultats expérimentaux présentés au chapitre précédent, le comportement mécanique de ce matériau est sensible au degré de saturation en eau et à la pression de confinement. En utilisant les paramètres du tableau 4.2, nous avons effectué les simulations des essais de compression hydrostatique et triaxiale pour la craie saturée et non saturée. Les résultats sont présentés sur les figures 4.9 à 4.12. D'une manière générale, il y'a une bonne concordance pour l'ensemble des essais et la prise en compte de la saturation permet de bien reproduire les résultats. Pour des valeurs de confinement supérieures au seuil d'effondrement des pores, la déformation plastique est dominée par le mécanisme de pore collapse. Il n'y a pas de contrainte au pic jusqu'à des valeurs importantes de déformations axiales. La rupture du matériau est définie par la destruction de sa structure poreuse par compaction. Ces phénomènes observés sont bien reproduits par le modèle proposé.

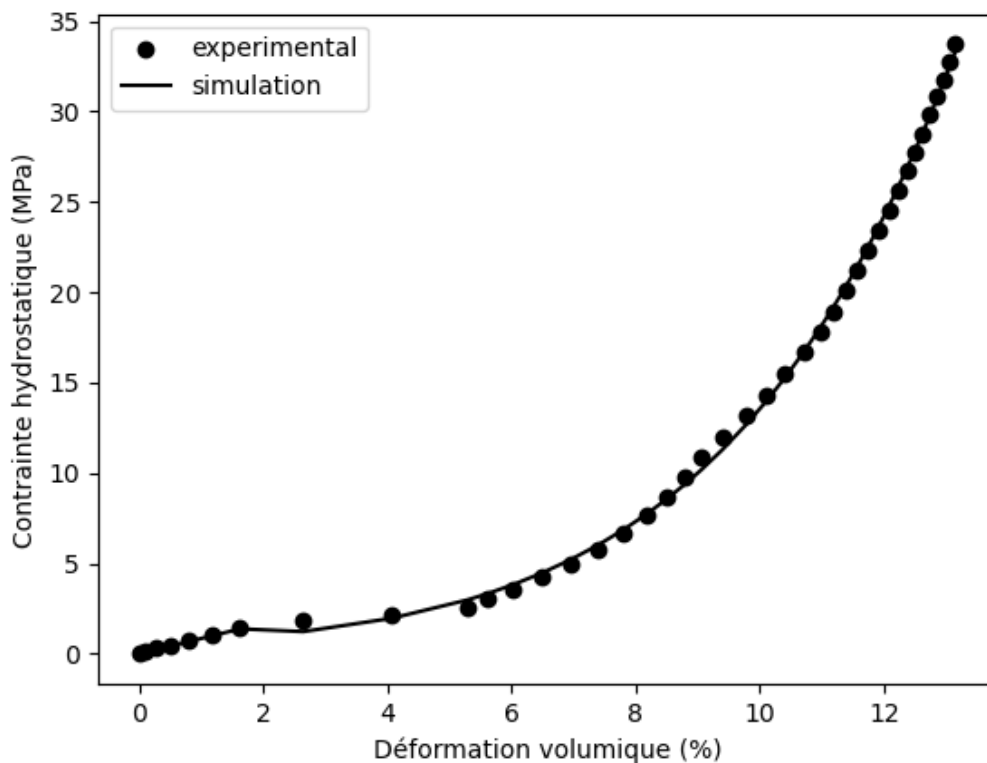


Figure 4.9 Simulation de l'essai de compression hydrostatique de la craie saturée à l'eau

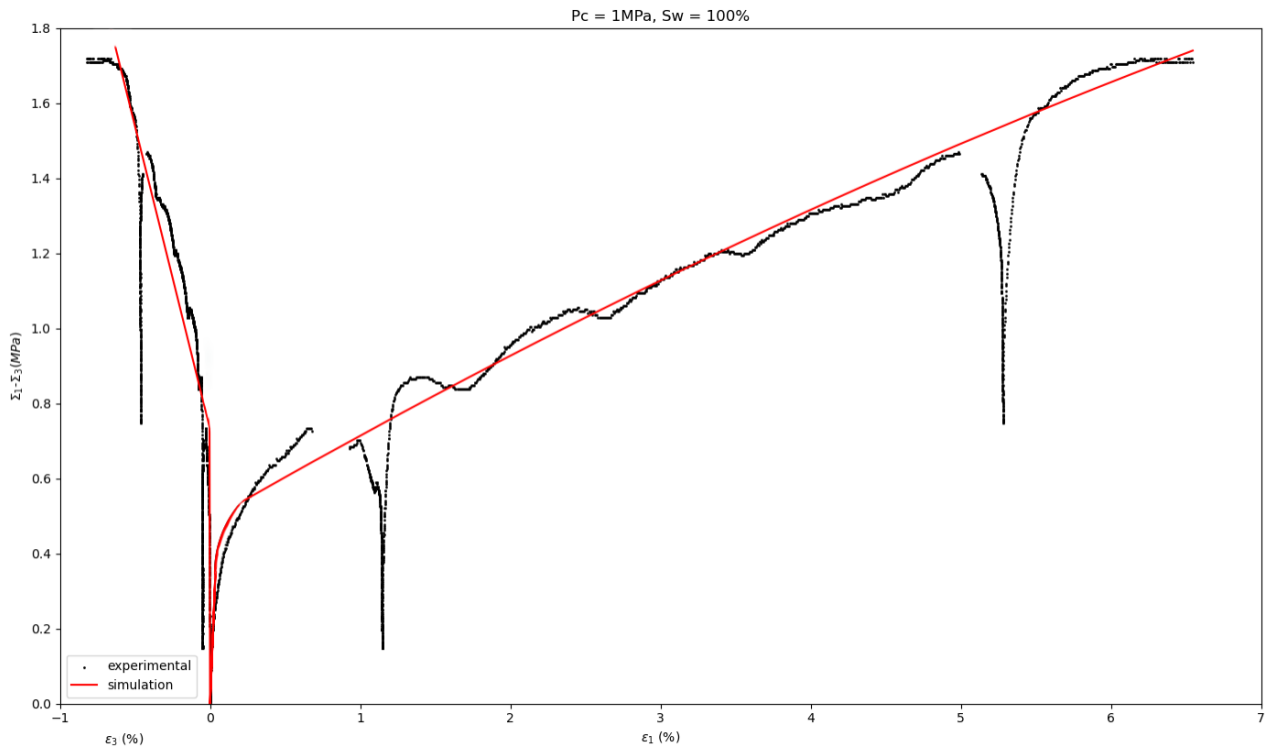


Figure 4.10 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 100% (1MPa)

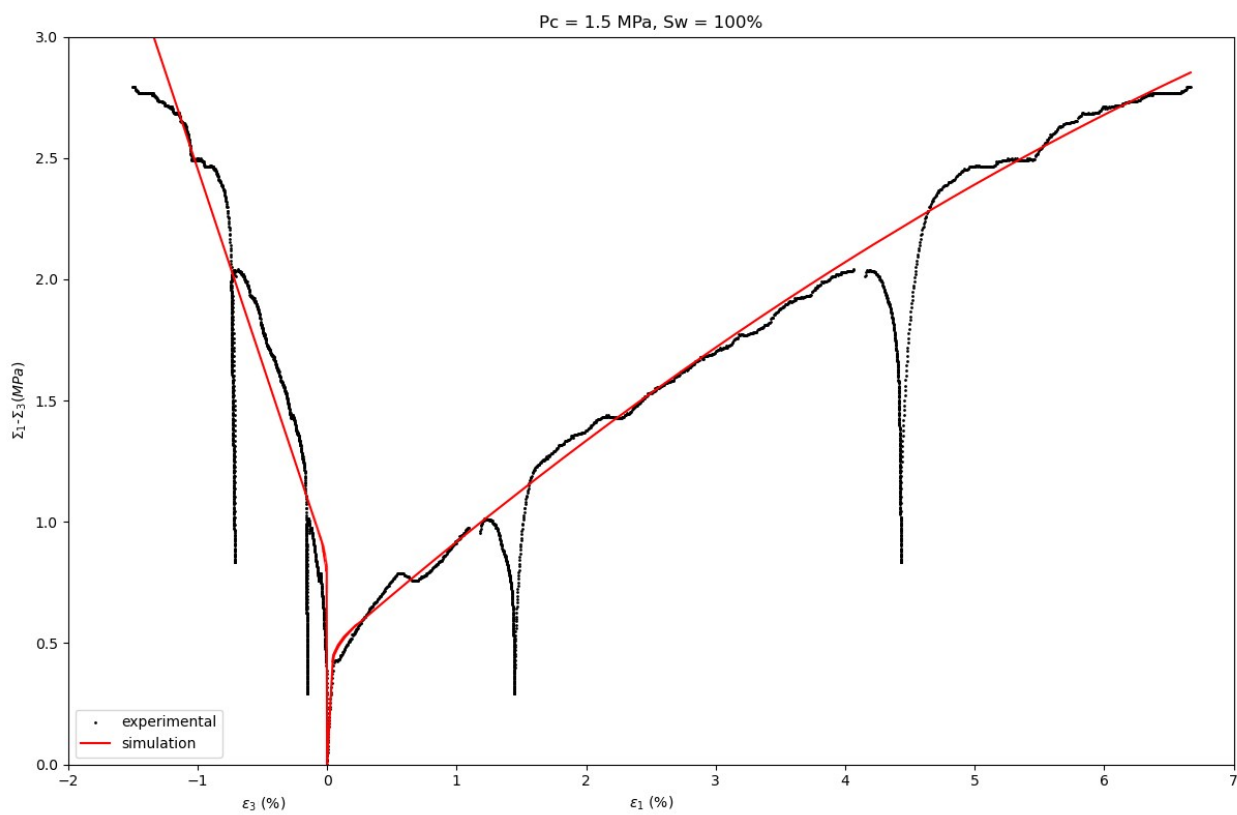


Figure 4.11 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 100% (1.5MPa)

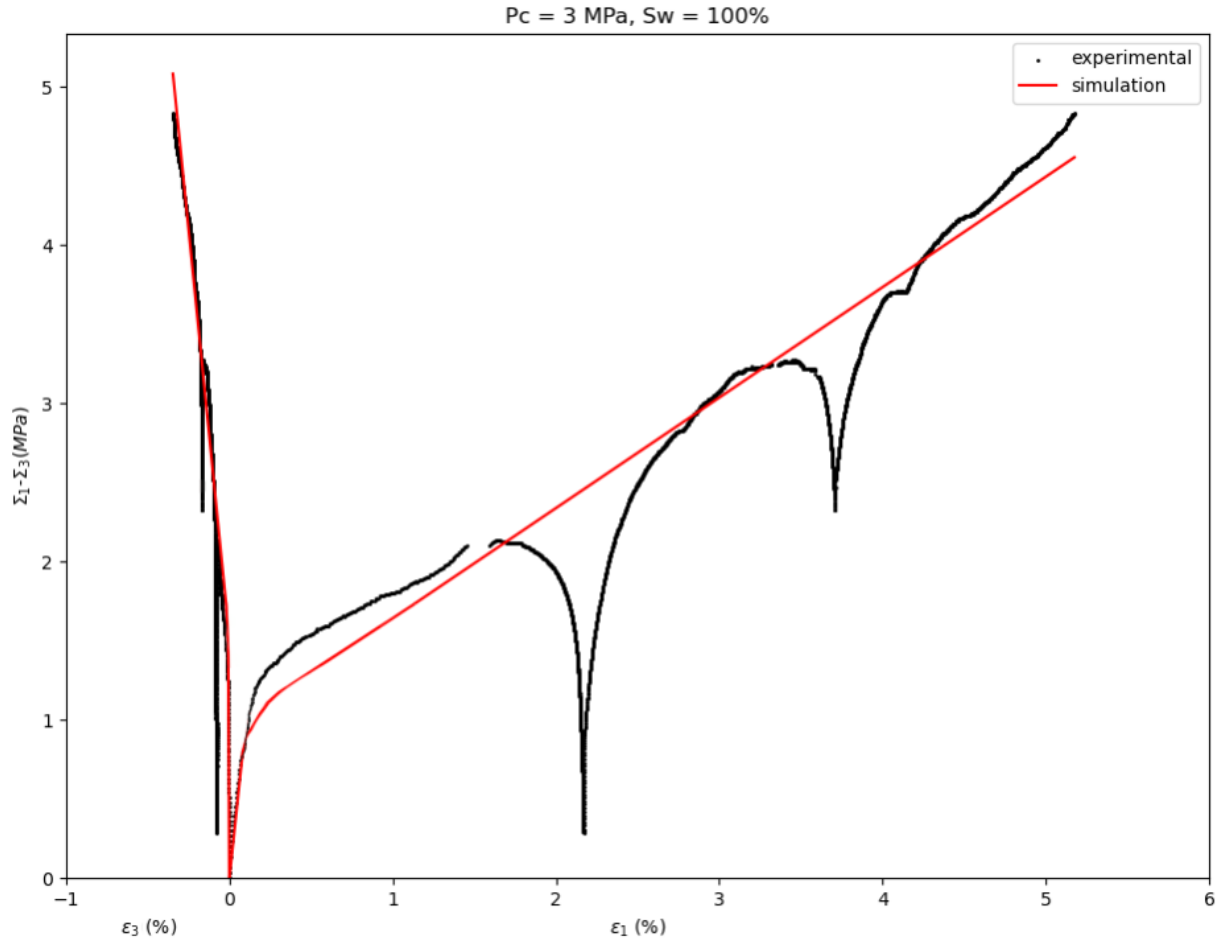


Figure 4.12 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 100% (3MPa)

4.7. Prise en compte de la saturation dans le modèle

4.7.1. Evolution de la loi d'écrouissage

Afin de prendre en compte l'influence de l'eau sur le comportement mécanique de cette craie, le modèle présenté ci-dessus a été modifié. Le degré de saturation est utilisé ici comme argument principal pour expliciter la sensibilité de la craie à l'eau. Pour l'ensemble des paramètres, le seuil de plasticité (seuil de pore collapse) est le paramètre le plus sensible à la saturation à l'eau. En prenant compte de cette dépendance, la loi d'écrouissage plastique devient :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0(S_w) (1 + a(\varepsilon_{eq}^p)^n e^{b\varepsilon_{eq}^p}) \quad (4.20)$$

En se basant sur les données expérimentales de la figure 4.13, la relation suivante est proposée pour décrire la variation du seuil de pore collapse en fonction de la saturation :

$$\sigma_0(S_w) = \sigma_0(S_w = 100\%)e^{-d\frac{S_w}{1-S_w}} \quad (4.21)$$

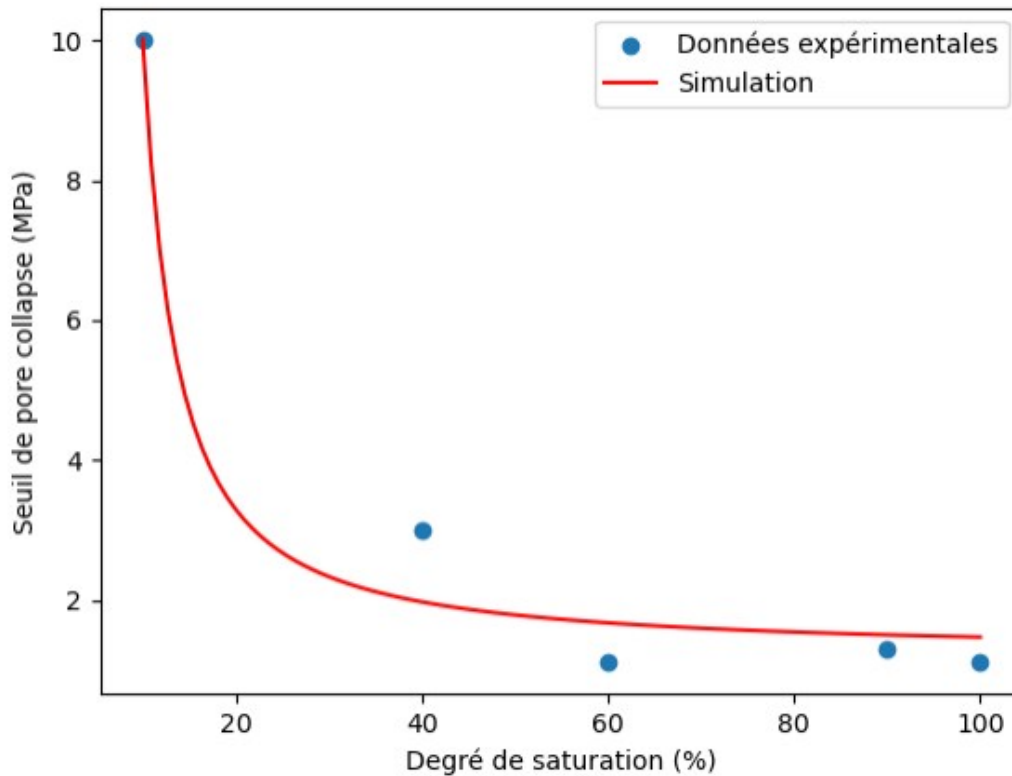


Figure 4.13 Variation du seuil plastique en fonction de la saturation en eau

4.7.2. Simulation des essais en laboratoire et comparaison

En introduisant les équations (4.20) et (4.21) dans le modèle, nous avons effectué la simulation des essais triaxiaux à différents degrés de saturation (40% et 90%). Les comparaisons entre les simulations numériques et les données expérimentales sont présentées dans les figures 4.14 et 4.15. De façon générale, on note une bonne concordance pour l'ensemble des essais également. L'influence de l'eau sur le comportement mécanique de cette craie est bien prise en compte. Ces résultats offrent une perspective intéressante notamment pour la réalisation de calculs à l'échelle de la carrière souterraine.

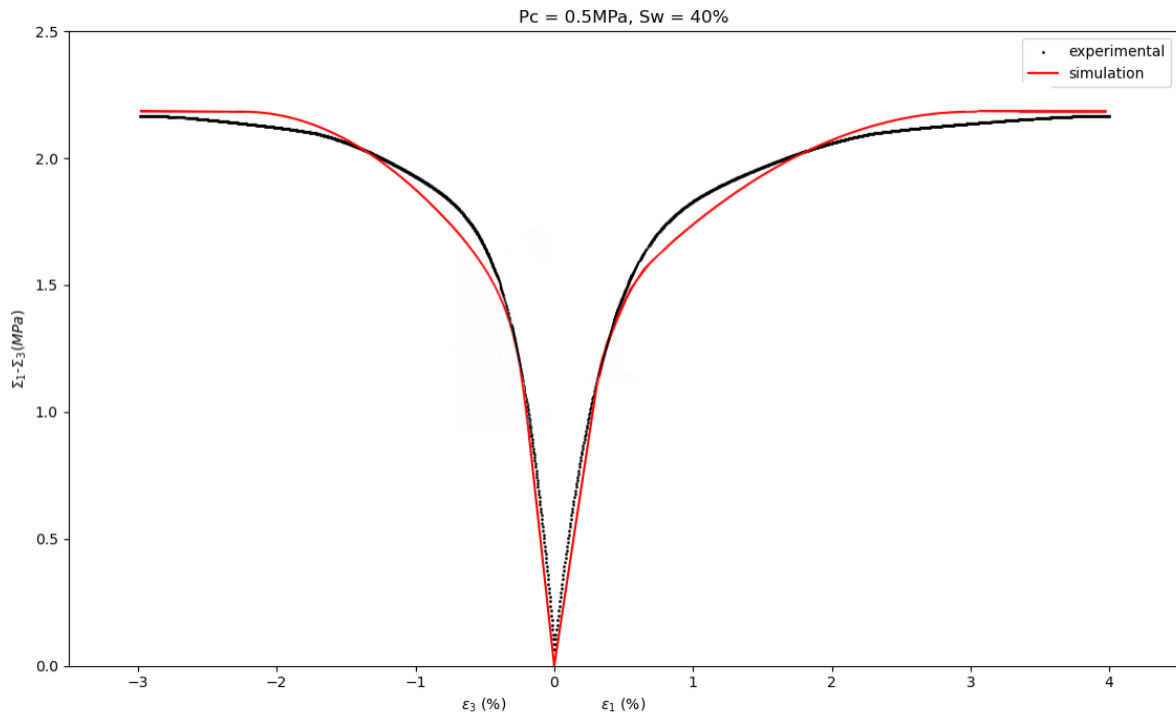


Figure 4.14 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 40% (0.5MPa)

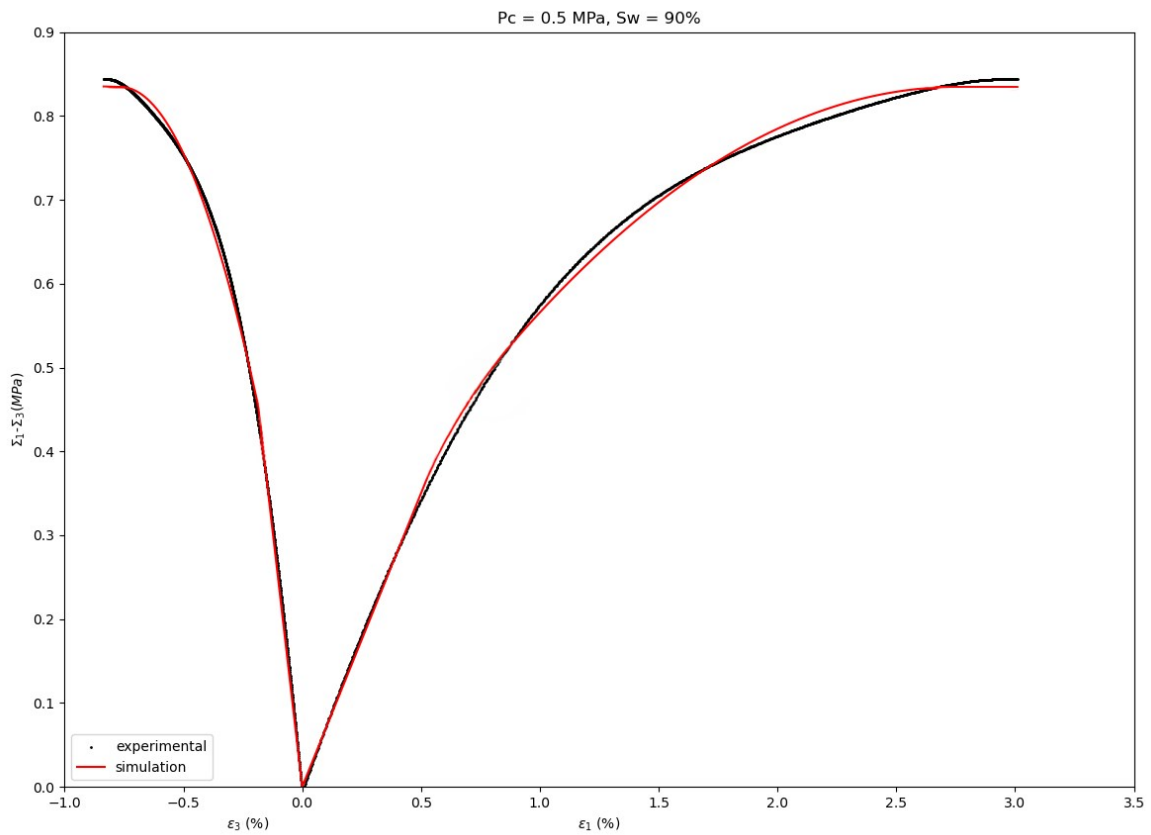


Figure 4.15 Simulation d'un essai de compression triaxiale de la craie saturée à 90% (0.5MPa)

4.8. Conclusion

En s'appuyant sur la micromécanique, le modèle de Shao et Shen (2018) permet de simuler le comportement mécanique de la craie en tenant compte de l'évolution de la porosité. Une extension de ce modèle à l'influence des variations de degré de saturation a été présentée et appliquée à la craie de Château-Landon dans ce dernier chapitre. La porosité est un facteur qui influe fortement sur le comportement ductile des géomatériaux soumis à une déformation plastique. Nous avons opté pour un critère de plasticité issu de l'homogénéisation non-linéaire d'un milieu poreux composé d'une matrice solide de type Drucker et Prager (1952), l'évolution de la porosité sous des charges triaxiales et la saturation en eau. A l'aide d'une loi d'écoulement plastique associée, la fonction de charge permet de rendre compte des mécanismes d'effondrement des pores et de cisaillement plastique qui régissent le comportement mécanique de ce matériau. Enfin, le modèle a été validé sur les données des essais triaxiaux réalisés sous différentes pressions de confinement et différents degrés de saturation.

Conclusion générale et perspectives

Réalisée en collaboration entre l'équipe du laboratoire LaMcube de l'Université de Lille et la Direction Sites et Territoires de l'Ineris, la présente thèse représente une contribution à la compréhension du comportement mécanique à court et à long terme des carrières souterraines de craie abandonnées, mettant particulièrement l'accent sur l'influence de la saturation sur la craie de Château-Landon.

Le premier chapitre a jeté les bases de cette étude en mettant en lumière la répartition de ces carrières à travers la France, tout en identifiant les facteurs qui contribuent généralement à leur dégradation. La problématique a été illustrée à travers le cas de la carrière Beaulieu, dont l'effondrement survenu à la suite de précipitations intenses et de la crue du Loing, a démontré l'impact critique de l'eau sur la stabilité de celles-ci. Très vite l'Ineris a compris la nécessité d'étudier en profondeur le comportement mécanique des carrières souterraines, en particulier face à leur vieillissement et au changement climatique qui peut engendrer des phases de précipitations exceptionnelles. Ainsi depuis fin 2019, l'Ineris a instrumenté la carrière Royer qui se situe proche de la carrière Beaulieu effondrée pour suivre en temps réel son évolution et en particulier comprendre le lien complexe de l'eau et de la craie de Château-Landon. Les observations préliminaires mettent en évidence des fluctuations saisonnières, caractérisées par des variations de l'humidité relative, de la teneur en eau dans les piliers et du niveau d'eau dans la nappe qui passe sous la carrière. Néanmoins aucune instabilité n'a été détecté à ce jour, confirmant la complexité des phénomènes.

Pour partir sur une base solide avant d'aborder les essais et la modélisation, les caractéristiques de la craie ont été présentés au deuxième chapitre. Les données issues de l'instrumentation combinées à une analyse bibliographique exhaustive, ont mis en lumière la diversité et la complexité des carrières souterraines abandonnées ainsi que des propriétés intrinsèques du matériau craie. De plus l'analyse des travaux existants sur la craie de Château-Landon ont montré que c'est une craie très peu résistance par rapport à d'autres craies qui sont décrites dans la littérature. Ils ont également montré la sensibilité de cette craie et l'importante de la mise en place d'une métrologie adaptée pour l'obtention de résultats expérimentaux exploitables et fiables.

De nombreux essais ont pu être réalisés et présentés au troisième chapitre malgré les difficultés inhérentes à ce matériau fournissant des données cruciales sur le comportement de cette craie dans des conditions variables de saturation. Les résultats obtenus pour les propriétés de rétention sont en accord avec la littérature. Ils montrent qu'une variation d'humidité dans la carrière entre 90% et 100% peut saturer/désaturer la surface des piliers dans la galerie. Les différents essais mécaniques réalisés à savoir des essais hydrostatiques, triaxiaux et de fluage à différents états de saturation et différentes pressions de confinement en utilisant une cellule triaxiale ont montré l'effet de l'eau et du temps sur le comportement de la craie de Château-Landon. Les résultats ont montré que le degré de saturation en eau influe nettement le seuil de plasticité de la craie ainsi que ses propriétés élastiques, ainsi l'augmentation de la saturation entraîne une diminution du domaine élastique suivant un écrouissage hydrique négatif.

Les mesures in-situ de la teneur en eau et de la succion présentées par Conil et al. (2023) ont montré que les piliers ne sont pas totalement saturés dans la carrière Royer, passant de 50% de degré de saturation en eau en surface à 98% vers le cœur du pilier. Aux vus des résultats expérimentaux combinés aux mesures in-situ actuelles, on peut supposer que la zone de surface créée par la désaturation de la craie assure probablement un confinement qui permet son maintien grâce à la succion générée. Ce phénomène est peut-être à l'origine de l'effondrement des piliers de la carrière Beaulieu qui ont vu leur résistance chuter avec la montée de l'eau comme l'ont montré les résultats de nos essais en laboratoire. Ainsi une augmentation de la fréquence des inondations due au changement climatique peut représenter une menace importante pour la stabilité des carrières souterraines abandonnées.

Le modèle qui a été présenté dans le dernier chapitre permet de reproduire de manière plus que correcte les résultats obtenus en laboratoire. Ce modèle micromécanique basé sur celui de Shen et Shao (2018) a été amélioré afin de prendre en compte l'influence de la saturation. Les résultats obtenus ont validé la pertinence de cette approche, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses pour de futures applications. Pour valider ce modèle, plusieurs simulations ont été réalisées. Les résultats des simulations numériques ont été comparés aux données expérimentales à différents états de contrainte et de saturation des échantillons.

Ainsi afin d'approfondir nos connaissances et de guider les futurs travaux de recherche, plusieurs perspectives émergent naturellement.

D'un point de vue expérimental, il est crucial de consolider nos résultats actuels en réalisant des essais supplémentaires en laboratoire. En dépit des avancées considérables réalisées dans la caractérisation des massifs rocheux en laboratoire, la limitation inhérente aux échantillons de petite taille persiste, rendant délicate la compréhension de l'effet d'échelle. De plus, les essais de fluage en laboratoire, beaucoup plus courts que les processus naturels in situ (s'étalant sur quelques minutes à quelques mois contre plusieurs décennies voire siècles), soulignent la nécessité d'établir une base de données dédiée au vieillissement réel des cavités dans des conditions grandeur nature. Cette approche, axée sur des observations à long terme dans des environnements réels, constitue une étape essentielle pour mieux appréhender et anticiper les évolutions des carrières souterraines abandonnées au fil du temps. Ainsi, les capteurs de déformation installés dans la carrière Royer depuis fin 2019 ne montrent pas de déformation (Conil 2024) à l'instar des analyses de Lafrance (2016) la dégradation de cet ouvrage est probablement lié à un « vieillissement » plus qu'au caractère visqueux du matériau. L'étude de l'impact de la chimie de l'eau sur le comportement de ce matériau permettrait peut-être d'apporter des informations complémentaires.

D'un point de vue numérique, l'extension du modèle actuel au comportement à long terme en incluant des phénomènes de vieillissement (couplage chemo-mécanique) permettra de compléter les premiers résultats. L'intégration du modèle de comportement dans un code de calcul adapté permettra ensuite d'étudier la stabilité des carrières souterraines. Al Heib et al. (2023) a montré que l'effondrement de la carrière Beaulieu dépendait de plusieurs facteurs tels que le taux d'extraction, la présence d'une faille traversant la mine. Ce modèle peut permettre de réaliser des études et des calculs supplémentaires pour mieux comprendre les divers facteurs impliqués.

Références bibliographiques

- Al Heib, M., Conil, N., & Gombert, P. (2023). Influence of geology and topography on the occurrence of mine massive collapse—Back-analysis of a historical collapse of chalk mine (France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(6), 230.
- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- Andersen, M. A. (1992). The link between waterflood-induced compaction and rate-sensitive behavior in a weak north sea chalk, Deauville, France. *4th North Sea chalk symposium*.
- Augereau, A., Chaussé, C., Blin, O., Viré, M., & Bessac, J.-C. (2018). *Archéologie des carrières* (p. 76). <https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-des-carrieres/Histoire-de-l-extraction/Introduction>
- Auvray, C., Homand, F., Hoxha, D., & Didier, C. (2003). Influence du temps sur le comportement du gypse. *Colloque International Après-mine 2003*, NC.
- 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), 1531-1547.
- Balland, C., Al Heib, M., Watelet, J.-M., & Klein, E. (2017). *Impact des vibrations sur la stabilité des carrières souterraines* (p. 75). https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRS-17-164706-11171B-RAP-rapport-vibrations_CPA.pdf
- Bell, F. G., Cripps, J. C., Edmonds, C. N., & Culshaw, M. G. (1990). Chalk fabric and its relation to certain geotechnical properties. *International chalk symposium*, 187-194.
- Bérenger, N. (2017). *La gestion du risque cavités souterraines*. Cerema.

- Bérenger, N., Flahaut, R., Mathon, D., Kreziak, C., & Marty, F. (2014). *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique*. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - IFFSTAR. <https://hal.science/hal-01213555>
- Bignonnet, F., Dormieux, L., & Kondo, D. (2016). A micro-mechanical model for the plasticity of porous granular media and link with the Cam clay model. *International Journal of Plasticity*, 79, 259-274.
- Bonvallet, J. (1979). Une classification géotechnique des craies du nord utilisée pour l'étude de stabilité des carrières souterraines. *Revue Française de Géotechnique*, 8, 5-14.
- Bounenni, A. (2002). *Etude expérimentale de l'effet de l'endommagement sur la perméabilité des roches* [Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées]. <https://pastel.hal.science/file/index/docid/46635/filename/tel-00005690.pdf>
- Brignoli, M., Santarelli, F. J., & Righetti, C. (1994). Capillary phenomena in an impure chalk. *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, SPE-28135-MS.
- Cao, Y. J., Shen, W. Q., Burlion, N., & Shao, J. F. (2018). Effects of inclusions and pores on plastic and viscoplastic deformation of rock-like materials. *International Journal of Plasticity*, 108, 107-124. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.04.015>
- Cassiani, G., Brovelli, A., & Hueckel, T. (2017). A strain-rate-dependent modified Cam-Clay model for the simulation of soil/rock compaction. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 11, 42-51.
- Chao, C., Yajun, C., Yanli, J., Xuelei, D., Shifan, L., & Kuan, Z. (2022). A Simple Elastoplastic Damage Constitutive Model of Porous Rock Materials. *Frontiers in Physics*, 10, 838827.
- Charlier, R., & Radu, J.-P. (2017). On the constitutive equations of the chalk. In *Numerical Methods in Geomechanics Volume 1* (p. 509-513). Routledge.

- Cheng, L., Jia, Y., Oueslati, A., de Saxcé, G., & Kondo, D. (2015). A bipotential-based limit analysis and homogenization of ductile porous materials with non-associated Drucker–Prager matrix. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 77, 1-26.
- Clayton, C. R. I. (1983). The influence of diagenesis on some index properties of chalk in England. *Geotechnique*, 33(3), 225-241.
- 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.
- Commissariat général au développement durable. (2020, septembre 30). *Les cavités souterraines abandonnées (hors mines) : Un risque majeur en France*. notre-environnement. <http://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/risques/les-mouvements-de-terrain-et-les-erosions-cotieres-ressources/article/les-cavites-souterraines-hors-mines>
- Conil, N. (2024). *Bilan 2023 de l'observatoire de Château-Landon (77)* (p. 27). Ineris.
- Conil, N., Gombert, P., Al Heib, M., Spitzenteder, N., Muller, R., Gaumet, F., & Pajiep, D. (2023a). An underground research laboratory at Château-Landon (France) to study the impact of climate change on the stability of abandoned mines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(1), 11.
- Conil, N., Gombert, P., Al Heib, M., Spitzenteder, N., Muller, R., Gaumet, F., & Pajiep, D. (2023b). An underground research laboratory at Château-Landon (France) to study the impact of climate change on the stability of abandoned mines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-03028-9>
- Conil, N., Talandier, J., Djizanne, H., De La Vaissière, R., Righini-Waz, C., Auvray, C., Morlot, C., & Armand, G. (2018). How rock samples can be representative of in situ

- condition : A case study of Callovo-Oxfordian claystones. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 613-623.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.02.004>
- Culshaw, M. G. (2015). Ulusay, R (ed.), 2015. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring : 2007–2014 : Cham, Switzerland : Springer. DOI 10.1007/978-3-319-007713-0. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(4), 1499-1500.
- Dahou, A. (1995). *Contribution à l'étude du comportement élasto-visco-plastique d'une craie poreuse* [Thèse de doctorat]. Université des sciences et technologies de Lille.
- Datcheva, M., Charlier, R., & Collin, F. (2000). Constitutive equations and numerical modelling of time effects in soft porous rocks. *International Conference on Numerical Analysis and Its Applications*, 222-229.
- 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), 131-147.
- De Gennaro, V., Delage, P., Priol, G., Collin, F., & Cui, Y.-J. (2004). On the collapse behaviour of oil reservoir chalk. *Géotechnique*, 54(6), 415-420.
- De Gennaro, V., & Pereira, J. M. (2008). Viscoplastic modelling of unsaturated geomaterials. *Proc. the 12th international conference of international association for computer methods and advances in geomechanics (IACMAG), Goa, India*, 2232-2241.
- Delebecque, N. (2017). *Etude de la bio-calcification des coccolithophoridés dans un contexte d'acidification des océans. Calibrations de proxies (B/Ca et $\delta^{11}B$) du pH dans les coccolithes* [Thèse de doctorat]. Université de Brest.
- Delsalle, P. (1993). *La France industrielle aux XVIe, XVIIe, XVIIIe siècles*. Editions OPHRYS.

- Desai, C. S., & Salami, M. R. (1987). A constitutive model and associated testing for soft rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24(5), 299-307.
- de Waal, J. A. (1986). *On the rate type compaction behaviour of sandstone reservoir rock*. Technische Hogeschool Delft Delft, Netherlands.
- Didier, C., Al Heib, M., Gombert, P., & Charmoille, A. (2010). *Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines : Etat des connaissances* (p. 102). Ineris.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/026/44026074.pdf
- Doremus, C., & Henry, J. P. (1985). Caractérisation des craies du Nord de la France par porosimétrie au mercure. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 104, 49-51.
- Doré-Ossipyan, C., Sulem, J., Bornert, M., Aïmedieu, P., Dimanov, A., de Greef, V., & King, A. (2023). Multi-scale analysis of a porous carbonate rock under triaxial conditions. *ISRM Congress*, ISRM-15CONGRESS-2023-128.
- Drucker, D. C., & Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*, 10(2), 157-165.
- Drucker, D. C., Prager, W., & Greenberg, H. J. (1952). Extended limit design theorems for continuous media. *Quarterly of applied mathematics*, 9(4), 381-389.
- 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), 321-343.
- Engstrøm, F. (1992). Rock mechanical properties of Danish North Sea chalk. *Proceedings of 4th North Sea Chalk Sym, Deauville*.
- Fabricius, I. L. (2007). Chalk : Composition, diagenesis and physical properties. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 55, 97-128.

- Foucault, A., Raoult, J.-F., Cecca, F., & Platevoet, B. (2014). *Dictionnaire de Géologie-8e éd. : Tout en couleur-5000 définitions-Français/Anglais*. Dunod.
- Georgieva, T. D. (2022). *Understanding the failure mechanisms of Malogne underground quarry and assess the influence of the underlying mining works* [PhD Thesis]. UMONS - Université de Mons [Polytechnique], Mons, Belgium.
- Geremia, D., David, C., Ismail, R., & El Haitami, A. (2021). An Integrated Study of Water Weakening and Fluid Rock Interaction Processes in Porous Rocks: Linking Mechanical Behavior to Surface Properties. *Applied Sciences*, *11*(23), 11437. <https://doi.org/10.3390/app112311437>
- Ghellab, S. (2020). *Diagnostic du fontis de BKII–la mine de Boukhadra–Tebessa*. [Thèse de doctorat]. Université de Tebessa.
- Gombert, P., & Cherkaoui, A. (2011). Analyse climatologique, hydrologique et hydrogéologique des effondrements survenus à Château-Landon (77) aux XIXe et XXe siècles. *Report 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).
- Guo, T. F., Faleskog, J., & Shih, C. F. (2008). Continuum modeling of a porous solid with pressure-sensitive dilatant matrix. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *56*(6), 2188-2212.
- 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*.
- Gutierrez, M., Øino, L. E., & Høeg, K. (2000). The effect of fluid content on the mechanical behaviour of fractures in chalk. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *33*, 93-117.

- Gutierrez, M. S. (1999). Modelling of Time-Dependent Chalk Behavior and Chalk-Water Interaction. *NGI report, 541105-4*.
- Hadizadeh, J., & Law, R. D. (1991). Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 28(5), 431-439.
- Hazebrouck, R., & Duthoit, B. (1979). Particularités du comportement mécanique des craies : Rôle de l'eau—Rupture sous contrainte hydrostatique. *Revue Française de Géotechnique*, 8, 45-50.
- He, Z., Dormieux, L., Lemarchand, E., & Kondo, D. (2013). Cohesive Mohr–Coulomb interface effects on the strength criterion of materials with granular-based microstructure. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 42, 430-440.
- Helleman, R., Renders, P. J. N., Gratier, J. P., & Guiguet, R. (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. The Geochemical Society, Special Publication*, 7, 129-152.
- Hill, R. (1951). LXXXVIII. On the state of stress in a plastic-rigid body at the yield point. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 42(331), 868-875.
- 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), 151-170.
- 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*. Université de Lille 1.
- Homand, S., & Shao, J. F. (2000). Mechanical behaviour of a porous chalk and effect of saturating fluid. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal*

- on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 5(7), 583-606.
- Huang, Y., Shen, W. Q., Shao, J.-F., Guéry, A. A.-C., & Jia, Y. (2014). Multi-scale modeling of time-dependent behavior of claystones with a viscoplastic compressible porous matrix. *Mechanics of Materials*, 79, 25-34.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. (2009). *Fundamentals of rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- Jeong, J., Mertz, J. D., Adib-Ramezani, H., Beck, K., Bigas, J. P., & Al-Mukhtar, M. (2008). Influence de la teneur en eau sur la déformation du tuffeau et des mortiers. *Colloque National sur les Variations Dimensionnelles des Géomatériaux, Saint-Lazaire, France*, 3-5.
- Kibikas, W. M., Choens, R. C., Bauer, S. J., Shalev, E., & Lyakhovsky, V. (2023). Water-Weakening and Time-Dependent Deformation of Organic-Rich Chalks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(11), 8041-8059.
- Kondo, D. (2019). Micromécanique et comportements de géomatériaux : Enjeux et défis d'un mariage d'intérêt. *24e Congrès Français de Mécanique*.
- Kreziak, C., & Watelet, J.-M. (2016). Analyse et interrogations liées à l'effondrement de la carrière souterraine de craie de Lorroy en 1910. 8. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2016)" Analyser concevoir et aménager dans la durée"*.
- Krinner, G., Guivarch, C., Hourcade, J.-C., Masson-Delmotte, V., Szopa, S., & Saheb, Y. (2023). *Publication du 6e rapport de synthèse du Giec*.
- Lade, P. V. (1977). Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *International journal of solids and structures*, 13(11), 1019-1035.

- Lafrance, N. (2016). *Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie* [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]. <http://www.theses.fr/2016LORR0059/document>
- Liénard, A. M. (1910). Procès-verbal d'enquête. *Effondrement d'une carrière. Mines, Arrondissement minéralogique de Versailles.*
- Lin, J., Shao, J.-F., & Kondo, D. (2011). A two scale model of porous rocks with Drucker-Prager matrix : Application to a sandstone. *Mechanics Research Communications*, 38(8), 602-606.
- Maalej, Y., Dormieux, L., & Sanahuja, J. (2009). Micromechanical approach to the failure criterion of granular media. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 28(3), 647-653.
- Maghous, S., Dormieux, L., & Barthelemy, J. (2009). Micromechanical approach to the strength properties of frictional geomaterials. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 28(1), 179-188.
- Marcial, D. (2004). *Comportement hydromécanique et microstructural des matériaux de barrière ouvragée.* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Masson, M. (1973). Petrophysique de la Craie. *BULL LIAISON LAB PONTS CHAUSS, SPECIAL V.*
- 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 des Ponts ParisTech.
- Matthews, M. C., & Clayton, C. R. I. (1993). *Influence of intact porosity on the engineering properties of a weak rock.*
- Mellinand, P., Frangin, E., Paone, F., Saget-Basseuil, E., Scherrer, N., Vacca-Goutoulli, M., & Voyez, C. (2020). La carrière de calcaire du boulevard de la Corderie à Marseille.

- Nouvelles recherches sur la sculpture en calcaire en Méditerranée: journée d'études*, 43-52.
- Mikolajczak, A., Pecquer, G., & Siwak, J. M. (1995). Etude comparative de quatre modèles applicables à des craies blanches. *Craies et schistes*.
- Mimran, Y. (1978). The induration of Upper Cretaceous Yorkshire and Irish Chalks. *Sedimentary Geology*, 20, 141-164.
- Monchiet, V., & Kondo, D. (2012). Exact solution of a plastic hollow sphere with a Mises–Schleicher matrix. *International Journal of Engineering Science*, 51, 168-178.
- Mori, T., & Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta metallurgica*, 21(5), 571-574.
- Morlier, P. (1970). Comportement des roches sous contrainte en fonction de leur teneur en eau. *La Houille Blanche*, 5, 471-476.
- Mortensen, J., Engstrøm, F., & Lind, I. (1998). The Relation Among Porosity, Permeability, and Specific Surface of Chalk From the Gorm Field, Danish North Sea. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1(03), 245-251. <https://doi.org/10.2118/31062-PA>
- Mortimore, R. N., & Fielding, P. M. (1990). The relationship between texture, density and strength of chalk. In *Chalk* (p. 109-132). Thomas Telford Publishing.
- Munoz-Castelblanco, J., Pereira, J.-M., Tang, A. M., & Delage, P. (2011). *Comportement de la craie du site de Lorroy* (p. 15) [Rapport de recherche]. Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Navier/Cermes.
- 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, 149-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.11.001>

- Nguyen, H. D. (2009). *Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie* [Thèse de doctorat]. Ecole des Ponts ParisTech.
- Nourani, M., Hemmingsen Schovsbo, N., Jahanbani Ghahfarokhi, A., Møller Nielsen, C., Sigalas, L., Meyer, A. G., Olsen, D., & Stemmerik, L. (2020). A predictive model for the wettability of chalk. *SN Applied Sciences*, 2, 1-12.
- Nova, R. (1992). Mathematical modeling of natural and engineered geomaterials. *Eur. J. Mechanics/A Solids*, 11, 135-154.
- Okhrimenko, D. V., Dalby, K. N., & Stipp, S. L. (2013). Adsorption properties of chalk : Contributions from calcite and clays. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 632-635.
- Pajiep, D., Conil, N., Souley, M., Shao, J.-F., & Xie, S. (2024). Experimental investigation of saturation effect on the mechanical behavior of Château-Landon chalk. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Papamichos, E., Brignoli, M., & Santarelli, F. J. (1997). An experimental and theoretical study of a partially saturated collapsible rock. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 2(3), 251-278.
- Paquette, Y. (1997). Comportement des terrains au-dessus des exploitations partielles Diagnostic de stabilité et organisation de la surveillance des exploitations partielles abandonnées Cas des carrières de la région Nord-Pas-de-Calais. *Conférence mondiale sur le développement durable des anciens pays charbonniers" l'Après-Charbon"*.
- Paterson, M. S., & Wong, T. (2005). *Experimental rock deformation : The brittle field* (Vol. 348). Springer.

- Pédini, C. (2013). Les Carrières de la Couronne de l'Antiquité à l'époque contemporaine. In *Les Carrières de la Couronne de l'Antiquité à l'époque contemporaine*. Publications du Centre Camille Jullian. <https://books.openedition.org/pccj/3163>
- Perzyna, P. (1963). The constitutive equation for work-hardening and rate sensitive plastic materials. *Proc. Vibrational Problems*, 4(3), 281-290.
- Pinon, C., Poulard, F., & Lecomte, A. (2022). Valorisation des anciens ouvrages souterrains : Combiner patrimoine et gestion du risque! *11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur*.
- Pomerol, C. (1988). *Découverte géologique de Paris et de l'Ile-de-France*. BRGM Editions.
- Priol, G. (2005). *Comportement mécanique différé et mouillabilité d'une craie pétrolière* [Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées]. <https://enpc.hal.science/tel-01381298v1/document>
- Priol, G., De Gennaro, V., Delage, P., Sorgi, C., Vicente, J., & Hernandis, C. (2004). Influence des fluides sur le comportement différé de la craie. 22. *Rencontres universitaires de génie civil*, NC.
- Priol, G., Gennaro, V. D., Delage, P., & Servant, T. (2007). Experimental investigation on the time dependent behaviour of a multiphase chalk. *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, 161-167.
- Ramadan, G. (2016). *La stabilité et l'évolution des cavités souterraines : Sur l'exemple des carrières souterraines de la Métropole lilloise*. Université de Lille 1.
- Renaud, V., Cherkaoui, A., Watelet, J.-M., Gombert, P., & Kreziak, C. (2019). Understanding the instability mechanisms of chalk mines in presence of water (France). *ISRM Congress*, ISRM-14CONGRESS-2019-306.
- Rhett, D. W. (1994). The mechanics of time-dependant strain in high porosity North Sea chalk. *EAPG/AAPG Special Conference on Chalk*, cp-56-00032.

- Rhett, D. W., & Teufel, L. W. (1992). Failure criteria for high porosity North Sea chalk. *Fourth North Sea Chalk Symposium, Deauville*.
- Risnes, R. (2001). Deformation and yield in high porosity outcrop chalk. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(1-2), 53-57.
- Risnes, R., & Flaageng, O. (1999). Mechanical properties of chalk with emphasis on chalk-fluid interactions and micromechanical aspects. *Oil & Gas Science and Technology*, 54(6), 751-758.
- Risnes, R., Gjesdal, S. A., Landaas, T. L., & Madland, I. (1994). Changes in mechanical properties of chalk caused by deformation and by pore pressure. *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, SPE-28136-MS.
- Risnes, R., Haghghi, H., Korsnes, R. I., & Natvik, O. (2003). Chalk–fluid interactions with glycol and brines. *Tectonophysics*, 370(1-4), 213-226.
- Risnes, R., Kristensen, C. N., & Andersen, M. A. (1996). Triaxial tests on high porosity chalk with different saturating fluids. *Fifth North Sea Chalk Symposium*, 12.
- 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.
- Salençon, J. (1983). *Calcul à la rupture et analyse limite* (Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées).
- Schleicher, F. von. (1926). Der Spannungszustand an der Fließgrenze (Plastizitätsbedingung). *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 6(3), 199-216.
- Schroeder, C. (2002). *Du coccolithe au réservoir pétrolier* [Thèse de doctorat]. University of Liege.

- 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., Bois, A. P., Charlier, R., Collin, F., Cui, Y. J., Delage, P., Goulois, A., Illing, P., Noel, F., & Maury, V. (2000). PASAChalk project (partially saturated chalk) : Constitutive modelling, determination of parameters using specific stress paths and application to the water-flooding. *Chalk symposium*.
- Schroeder, C., & Shao, J. (1996). Plastic deformation and capillary effects in chalks. *5th North Sea Chalk Symposium*, 1-14.
- Shao, J. (1987). *Etude du comportement d'une craie blanche très poreuse et modélisation* [These de doctorat, Lille 1]. <https://www.theses.fr/1987LIL10125>
- Shao, J. F., & Henry, J. P. (1991). Development of an elastoplastic model for porous rock. *International Journal of plasticity*, 7(1-2), 1-13.
- Shen, W. Q., Kondo, D., Dormieux, L., & Shao, J.-F. (2013). A closed-form three scale model for ductile rocks with a plastically compressible porous matrix. *Mechanics of Materials*, 59, 73-86.
- Shen, W. Q., Shao, J. F., Kondo, D., & De Saxcé, G. (2015). A new macroscopic criterion of porous materials with a Mises-Schleicher compressible matrix. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 49, 531-538.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2014.09.010>
- Shen, W. Q., & Shao, J.-F. (2016). An incremental micro-macro model for porous geomaterials with double porosity and inclusion. *International Journal of Plasticity*, 83, 37-54.
- Shen, W. Q., & Shao, J.-F. (2018). A micro-mechanics-based elastic–plastic model for porous rocks : Applications to sandstone and chalk. *Acta Geotechnica*, 13, 329-340.

- Siwak, J. M., Pecqueur, G., & Mikolajczak, A. (1994). Behaviour of chalks. *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, SPE-28137-MS.
- Siwak, J.-M. (1994). *Comportement et modélisation de la craie* [Thèse de doctorat]. Université de Lille 1.
- Sorgi, C., & De Gennaro, V. (2007). Analyse microstructurale au MEB environnemental d'une craie soumise à chargement hydrique et mécanique. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(7), 468-481.
- Sorgi, C., De Gennaro, V., & Chen, D. (2011). Water-rock interaction mechanisms and ageing processes in chalk. *Advances in Data, Methods, Models and Their Applications in Geoscience*, 9, 163-180.
- Suklje, L. (1957). The analysis of the consolidation process by the isotaches method. *Proc. of 4th ICSMFE, 1957, 1*, 200-206.
- Sultan, N. (1997). *Etude du comportement thermo-mécanique de l'argile de Boom : Expériences et modélisation* [Thèse de doctorat]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Sultan, N., Delage, P., & Cui, Y. J. (2000). Comportement thermomécanique de l'argile de Boom. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIB-Mechanics*, 328(6), 457-463.
- 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. L., 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), 543-555.

- 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.
- Tallon, J. P. (1976). *Influence de la texture sur certaines propriétés géotechniques des craies franches* [Thèse de doctorat].
- Tang, A.-M. (2005). *Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Toulemont, M., & Potherat, P. (2002). Evaluation des aleas liés aux cavités souterraines. *Collection environnement-les risques naturels-guide technique*.
- Tritsch, J.-J. (2005). Les mécanismes de ruptures des carrières souterraines abandonnées. *Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées: séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS-réseau des LPC*, 74-92.
- Tritsch, J.-J., Durville, J. L., & Potherat, P. (2004). Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines : Un guide technique. *Journées nationales de géotechnique et de géologie*, 493-502.
- Watelet, J. M. (1996). Méthode d'analyse et diagnostic des conditions de stabilité des carrières souterraines. *Mém. de diplôme d'ing. ISAM. CNAM, Paris*.
- Xie, S. (2005). *Contribution à l'étude du comportement mécanique d'une roche poreuse* [Thèse de doctorat]. Université de Lille 1.
- Xie, S., & Shao, J. (2006). Elastoplastic deformation of a porous rock and water interaction. *International Journal of Plasticity*, 22(12), 2195-2225.
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.03.002>
- Xie, S. Y., & Shao, J.-F. (2015). An experimental study and constitutive modeling of saturated porous rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 223-234.

- Zeng, T., Shao, J.-F., & Xu, W. Y. (2015). A micromechanical model for the elastic–plastic behavior of porous rocks. *Computers and Geotechnics*, *70*, 130-137.
- Zhang, J., Shen, W. Q., Oueslati, A., & De Saxcé, G. (2017). A macroscopic criterion of shakedown limit for ductile porous materials subjected to general cyclic loadings. *Mechanics of Materials*, *115*, 76-87.