



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Du coccolithe au réservoir pétrolier
Approche phénoménologique du
comportement mécanique de la craie
en vue de sa modélisation à différentes échelles

Christian Schroeder
Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées
janvier 2002

Avant-propos

Ce mémoire est basé sur 25 ans d'études personnelles de la craie, réalisées aux LGIH, dans différents cadres.

Les premiers travaux sur la craie ont commencé en 1976, dans le cadre de recherches pures, sous l'impulsion du Prof. L. Calembert.

C'est à partir de 1982, jusqu'en 1992, qu'à la demande de Petrofina, les LGIH ont participé aux différents JCR¹ et ont réalisé les multiples essais sur la craie qui constituent une bonne partie de la matière première de ce mémoire.

Ensuite, les recherches sur la craie ont été poursuivies, entre autres, au sein du Greco Géomatériaux puis de l'ALERT² et à l'occasion d'études diverses pour entreprises, bureaux d'études ou sociétés pétrolières (Petrofina, Statoil, Elf) et de collaborations avec d'autres universités et grandes écoles (Lille, Reims, Besançon, Stavanger, Paris, Douai).

Elles se sont poursuivies et se poursuivent toujours, dans le cadre de divers projets "Tournesol"³ dans le cadre du crédit d'impulsion "CO₂ et, depuis 1997, dans celui des projets européens Pasachalk⁴ puis Pasachalk2 (prévu jusqu'en 2003).

¹ "Joint Chalk Research". Le JCR est un réseau de recherches sur la craie de Mer du Nord, coordonné par le NPD (Norwegian Petroleum Directorate) et dont les travaux sont effectués par les compagnies pétrolières travaillant sur les gisements crayeux de Mer du Nord (Total, Petrofina, Elf, Amoco, Phillips, Norsk Hydro, Statoil, Maersk, Agip...)

² Alliance of Laboratories in Europe for Research and Technology

³ Conventions bilatérales France - Communauté française de Belgique" Les partenaires français sont l'Université de Lille (Eudil), l'Université de Reims, et l'Université de Franche-Comté; la FPMs est co-partenaire de certains de ces projets.

⁴ **P**artially **S**aturated **C**HALK. Programme Européen dont les partenaires sont ELF Norge puis TOTALFINAELF Exploration Norway, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (CERMES) à Paris et deux services de l'Université de Liège le MSM-DIG et le LGIH (coordonnateur), les deux derniers étant regroupés, depuis le 1er octobre 2001 au sein du département GéoMaC de l'Université de Liège

Table des matières

1 INTRODUCTION	17
2 LA CRAIE	19
2.1 Définition.....	19
2.2 Composition.....	20
2.2.1 Fossiles	20
2.2.2 Minéralogie.....	22
2.3 Cadre géologique, paléo-géographique et tectonique	23
2.3.1 Age	23
2.3.2 Conditions de dépôts.....	23
2.3.3 Répartition des gisements crayeux.....	24
2.3.4 Tectonique.....	27
2.4 Structure et pétrophysique	30
2.4.1 Structure.....	30
2.4.2 Porosité.....	33
2.4.2.1 détermination indirecte.....	33
2.4.2.2 analyse d'images.....	34
2.4.2.3 tomographie aux rayons X	34
2.4.2.4 porosimétrie au mercure haute pression.....	35
2.4.2.5 surface spécifique.....	40
2.5 L'eau dans les craies.....	41
2.5.1 Types d'eaux -répartition	41
2.5.2 Etats à saturation.....	42
2.5.3 La craie non saturée	44
2.5.3.1 notion de succion	44
2.5.3.2 méthodes de contrôle de la succion.....	45
2.5.3.3 courbes de rétention	47
2.5.4 Mouillabilité.....	49
2.5.4.1 terminologie	49
2.5.4.2 généralités	50
2.5.4.3 mesure de la mouillabilité	51
2.5.4.4 modification de la mouillabilité	53
2.5.5 Perméabilité.....	55
2.5.5.1 rappel : notions de perméabilité - unités	55
2.5.5.2 mesure de la perméabilité - cas du fluide unique - facteurs principaux	56
2.5.5.3 mesure indirecte de la perméabilité - produit k.h.....	58
2.5.5.4 notion de perméabilités relatives.....	60
2.5.6 Imbibition - déplacement	62
2.6 Caractéristiques géophysiques	64
2.6.1 Propriétés électriques	64
2.6.2 Propriétés sismiques.....	64
2.6.2.1 en laboratoire.....	64
2.6.2.2 in situ.....	67

3 LA CRAIE COMME ROCHE RESERVOIR PETROLIER	69
3.1 Géologie.....	70
3.2 Le champ d'Ekofisk	72
3.3 Problèmes - la "subsidence"	77
4 ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA CRAIE	81
4.1 Introduction.....	81
4.2 Caractérisation des craies testées	82
4.2.1 Craie de Lixhe.....	82
4.2.2 Craies de Mer du Nord.....	83
4.3 Comportement mécanique - description générale	86
4.4 Le modèle Pasachalk	90
4.4.1 Aperçu de différents types de modèles	90
4.4.2 Le modèle de Barcelone.....	91
4.4.3 Le modèle Pasachalk	92
4.5 Détermination expérimentale des surfaces de plasticité	96
4.6 Influence de la porosité et de la teneur en silice	98
4.7 Interaction fluide - squelette : quantification de l'influence des fluides interstitiels	105
4.7.1 Essais avec fluides et viscosités divers	105
4.7.2 Cas particuliers de la craie sèche et de la craie saturée en méthanol.....	108
4.7.3 Waterflooding	112
4.7.4 Influence du degré initial de saturation en eau	122
4.8 Effet de la température	126
4.9 Effet différé : fluage,	127
4.10 Comportements spécifiques	137
4.10.1 Extrusion.....	137
4.10.2 Effritement	140
4.11 Discussion sur les forces de liaisons interparticulaires et sur les interactions fluides -squelette	143
5 AMELIORATION DE LA RECUPERATION DU PETROLE ET REDUCTION DE L'EFFET DE SERRE PAR INJECTION DE CO2	147
6 PERSPECTIVES.....	152
7 CONCLUSION.....	154
8 REFERENCES	155

Tables des figures et tableaux

Figures

Figure 1-1: Monet - Les falaises d'Etretat.....	17
Figure 2-1 composition des roches sédimentaires craies - marnes - argiles....	19
Figure 2-2 : Coccolithes et plaquettes - craie campanienne de Lixhe	20
Figure 2-3 : Coccosphère (diamètre +/- 30 µm) craie campanienne de Lixhe..	21
Figure 2-4 : Analyse par microsonde électronique de la silice dans un échantillon de craie du gisement d'Ekofisk (Monjoie, Schroeder et al., 1985).....	22
Figure 2-5 Paléogéographique de l'Euregio Meuse-Rhin au Crétacé récent (Campanien ancien; 80 Ma; 42° N; climat chaud-sec) 1: Mer du nord - 2: Pays de la Ruhr - 3: Baie d'Erkelenz - 4: Plaines de l'Eifel 5: Baie d'Aachen - 6: Falaise de Puth - 7: Haut-fond de Velm 8: Haut-fond de Warnant - 9: Péninsule de Botrange - 10: Petit Estuaire. H : Hasselt - M : Maastricht - A : Aachen - L : Liège - B : Botrange Extrait de Bless & Fernandez-Narvaiza, (1995) (d'après Arnold et al., (1978), Kimpe et al. (1978), Kemper (1987) et Bless et al. (1991)).....	24
Figure 2-6 : Extension des transgressions du Crétacé récent (zones noires) Mortimore (1989) d'après Briden (1977) et Hancock & Kaufmann (1979)	25
Figure 2-7 Répartition des craies en Europe au Crétacé En blanc, les zones émergées; en grisé clair au centre, les dépôts du Cenomanien, au nord, les dépôts du Senonien, au Sud, zone de sédimentation profonde (flysch). Extrait de Tallon (1976), d'après Aubouin, (1968).....	26
Figure 2-8 : Répartition de la craie dans le monde En grisé : zones d'affleurement; les numéros indiquent les forages du DSDP d'après Mortimore (1989)	26
Figure 2-9: Tunnel sous la manche - profil en long (D'après document BRGM)	27
Figure 2-10: Carte schématique des grands ensembles structuraux méso-cénozoïques du Nord-Ouest européen. L : Londres, P : Paris, B: Bruxelles, Z.N.C.A.: Zone de Cisaillement Nord-Artois. Les flèches indiquent les orientations des contraintes majeures (d'après Vandycke, 1992).....	28
Figure 2-11: Principaux événements structuraux de Mer du Nord, du Jurassique au présent. (d'après Caillet et al., 1996).	29
Figure 2-12 : Structure d'une craie (Ekofisk formation Tor) - vue au MEB	30
Figure 2-13 : Photo MEB de "grains " et "pont de calcite" (Le Roux, 1973)	31
Figure 2-14 : Contacts solides (entourés d'un cercle) entre "grains" (Mata, 2001)	32

Figure 2-15 Types de pores et rayons d'entrées (d'après Tallon, 1976)	33
Figure 2-16 : exemple de tomographie de densité au scanner à rayons X a) section radiologique b) porosité obtenue par différence d'images (Mata, 2001).....	35
Figure 2-17 Courbes porosimétriques - craie campanienne (Tallon, 1976)	36
Figure 2-18 : Courbes d'injection de mercure dans un échantillon de craie campanienne du bassin de Mons (Gaviglio et al., 1997).....	38
Figure 2-19 courbes de répartition des pores mesurées sur différents types de craies françaises (d'après Masson, 1973).....	39
Figure 2-20 Désorption thermique (Lord et al, 1998)	42
Figure 2-21 saturation de la craie par imbibition	43
Figure 2-22 humidification de la craie par l'air ambiant	43
Figure 2-23 : représentation schématique d'un milieu granulaire non saturé ...	44
Figure 2-24 Cellule de Richards (d'après Delage & Cui, 2000)	45
Figure 2-25 : courbes de rétention de craies françaises et anglaises (d'après Masson, 1973)	48
Figure 2-26 - Courbes d'injection de mercure dans une craie de Mer du Nord (d'après Andersen, 1995).....	48
Figure 2-27 : Mouillabilité du système eau - huile - roche	50
Figure 2-28 : Définition des surfaces pour le calcul de l'indice de mouillabilité USBM (d'après Andersen, 1995)	52
Figure 2-29 : Méthode combinée Amott-USBM - voir significations des symboles dans le texte (d'après Andersen, 1995)	52
Figure 2-30 : Indice de mouillabilité Amott pour différents temps de maturation (d'après Graue et al., 1998)	54
Figure 2-31 : relation porosité - perméabilité - formation Tor	57
Figure 2-32: relation porosité - perméabilité - formation Ekofisk	57
Figure 2-33 : influence de l'état de contrainte sur la perméabilité	58
Figure 2-34 relation porosité - produit kh (d'après Coulon et al, 1999).....	59
Figure 2-35: Comparaison entre perméabilités déduites de l'essai kh et mesurées au perméamètre à charge constante.....	59
Figure 2-36 Déplacement d'huile par de l'eau au cours d'un "waterflooding". a)roche mouillable à l'eau b)roche mouillable à l'huile (d'après Anderson, 1987b).....	60
Figure 2-37 Perméabilités effectives du fluide mouillant et non mouillant (d'après Van Impe et al., 1999).....	61

Figure 2-38 Courbes typiques de perméabilités relatives (Anderson, 1978b) a) roche mouillable à l'eau b) roche mouillable à l'huile)	61
Figure 2-39: résultats des essais de balayages par de l'eau marquée au Cu EDTA, de craies saturées en huile ou en eau - la flèche indique le sens d'injection (Monjoie, Schroeder et al., 1985a)	62
Figure 2-40: Indice de continuité - influence des différentes porosités.....	65
Figure 2-41 : Evolution des vitesses de propagation des ondes sismiques de compression (vitesses soniques) en fonction de l'état de saturation de craies campaniennes.	66
Figure 2-42: Evolution des vitesses de propagation des ondes sismiques de cisaillement (ondes transversales) en fonction de l'état de saturation de craies campaniennes.	67
Figure 2-43: Etude de deux forages dans le bassin de Paris a) vitesses des ondes longitudinales, b) porosités forage 701 (carrés noirs) et 702 (cercles blancs) (d'après Bergues & Charpentier, 2000)	68
Figure 3-1: Champs pétroliers de Mer du Nord (D'après Masson et al., 1980)	69
Figure 3-2: Coupe géologique SW- NE passant par le centre de la Mer du Nord (Masson et al., 1980)	71
Figure 3-3: Traits majeurs de l'architecture du soubassement de la Mer du Nord avant la transgression crétacée (Masson et al., 1980).....	71
Figure 3-4 Situation des champs pétrolier dans la craie en Mer du Nord (D'Heur, 1989).....	73
Figure 3-5 : Coupe schématique du champ d'Ekofisk (d'après Masson et al., 1980).....	74
Figure 3-6 : Cadre stratigraphique du JCR (Fritsen et al., 2000).....	74
Figure 3-7 : Modèle de sédimentation de la craie au début du Danien (D'Heur, 1989).....	76
Figure 3-8 : Problèmes posés en cours d'exploitations de gisements pétroliers crayeux (d'après Andersen, 1995)	77
Figure 3-9: Pressions dans le gisement d'Ekofisk en 1971 et en 1985 (d'après Fonder et al., 1988).....	78
Figure 3-10: Evolution de la subsidence maximum en fonction du temps (l'origine correspond au milieu de l'année 1971, date de début de l'exploitation). Les chiffres de 1 à 7 correspondent à différentes hypothèses de taux d'injections de fluide. La courbe 8 est la prévision de la subsidence en l'absence d'injection. (Charlier, 1987)	79
Figure 4-1 : Essais de compression simple sur craie de Lixhe - modules de déformation et d'élasticité (Monjoie & Schroeder, 1989).....	86
Figure 4-2 : courbes contrainte - déformation de craies de Lixhe saturée au Soltrol - essais triaxiaux à différentes contraintes de confinement.....	87
Figure 4-3 : Essai de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Soltrol "élasticité", "pore collapse", plasticité.....	88

Figure 4-4 : Diagrammes contrainte effective radiale fonction de la contrainte effective axiale pour deux craies de Mer du Nord (D'après Da Silva et al, 1990).....	89
Figure 4-5: Modèle de Barcelone - surfaces de charge LC et SI - description des phénomènes de gonflement et d'effondrement.....	91
Figure 4-6 : Couplage entre SI et LC	92
Figure 4-7 Le modèle Pasachalk.....	95
Figure 4-8 : Chemins de contraintes -ruptures - surfaces de charges Echantillons saturés en huile (Soltrol).....	96
Figure 4-9: Chemins de contraintes -ruptures - surfaces de charges Echantillons saturés en eau.....	97
Figure 4-10 : Courbes contrainte - déformation normalisées - craies d'Ekofisk (document PPCoN, in Jones & Leddra, 1989)	98
Figure 4-11 : Cercles de Mohr de craies de Mer du Nord - Influence de la porosité et de la teneur en SiO ₂ (Danien et Maastrichtien) (Monjoie, Schroeder et al., 1985b).....	99
Figure 4-12 : Essais oedométriques sur craies de Mer du Nord de diverses porosités et teneurs en silice. Répartition en classes de porosités (Monjoie, Schroeder et al., 1990)	100
Figure 4-13 : Evolution du module oedométrique de craies de Mer du Nord en fonction de la porosité (d'après Da Siva et al, 1990). Les ronds, triangle et carrés désignent des puits d'échantillonnage; HQ signifie que l'échantillon est à haute teneur en quartz (plus de 12%).	101
Figure 4-14: Relation module oedométrique - module "d'élasticité" (d'après Da Silva et al., 1990)	102
Figure 4-15 : Module de Young en fonction de la porosité craies danoises - champs Tyra et Dan - (Engstrøm, 1972).....	103
Figure 4-16 : Coefficient de Poisson en fonction de la porosité craies danoises - champs Tyra et Dan - (Engstrøm, 1972)	103
Figure 4-17: Coefficient de Biot en fonction de la porosité tous types de craies (Engstrøm, 1972)	104
Figure 4-18 : "pore collapse" au cours d'essais de compression isotrope en fonction de la porosité craies danoises - champs Tyra et Dan (Engstrøm, 1972).....	104
Figure 4-19: Points représentatifs des états de contrainte au moment de la rupture pour des échantillons de craie de Lixhe, saturés en différents fluides, soumis à essais triaxiaux.....	106
Figure 4-20: Diagramme contrainte - déformation - phase isotrope des essais triaxiaux sur craies de Lixhe saturées en différents fluides.....	107

Figure 4-21: Diagramme contrainte - déformation - phase déviatorique des essais triaxiaux sur craies de Lixhe saturées en différents fluides (en rouges - bruns, les craies "à l'huile", en verts - bleus, les craies "à l'eau")	108
Figure 4-22 : Contrainte de rupture ("pore collapse") de craies de Lixhe saturées par des mélanges eau / méthanol (Grønås, 1991).....	109
Figure 4-23 : Potentiel zeta fonction de la teneur en méthanol d'un mélange eau / méthanol (Risnes et al., 2000)	111
Figure 4-24 : Essai de waterflooding - position des jauges de contrainte	113
Figure 4-25: Essai de waterflooding - courbes contrainte - déformation	114
Figure 4-26 : Essai de waterflooding - déformation des jauges de contrainte en fonction de la position théorique du front d'injection - position réelle des jauges.	114
Figure 4-27: Essai de waterflooding d'une craie sèche. Evolution de la déformation et du volume injecté (Schroeder et al., 1998).....	115
Figure 4-28 : Chemin de contraintes Essais de waterflooding complémentaires	116
Figure 4-29: Essai de waterflooding avec contraintes principales inversées - Evolution des déformations axiales. M1 à M4 : définitions des modules dans les différentes phases	117
Figure 4-30 ; Essai de waterflooding de comparaison, avec contraintes principales non inversées - Evolution des déformations axiales N.B. :l'échelle horizontale est le double de celle de la figure précédente.....	118
Figure 4-31 : Essai de waterflooding avec contraintes principales inversées - Evolution des déformations radiales. M1 à M4 : définitions des modules dans les différentes phases	118
Figure 4-32 : Essai de waterflooding de comparaison, avec contraintes principales non inversées - Evolution des déformations radiales N.B. :l'échelle horizontale est la moitié de celle de la figure précédente.....	119
Figure 4-33 : Essais proportionnels sur craies de Lixhe et waterflooding - diagrammes contraintes - déformations - première phase Les chiffres de la légende indiquent l'angle θ du chemin proportionnel.	120
Figure 4-34 : Déformations additionnelles durant le waterflooding, fonctions de l'état de contraintes	121
Figure 4-35 Essais proportionnels sur craies de Lixhe et waterflooding - diagrammes contraintes - déformations - seconde phase	121
Figure 4-36 ; Courbes de rétention eau - huile, craie de Lixhe (Pasachalk, 2001)	122
Figure 4-37 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Soltrol et eau avec différents degrés de saturation en eau, S_{wr} Exemples de courbes contraintes - déformations.....	123

Figure 4-38 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Soltrol et eau avec différents degrés de saturation en eau, S_{wr} . Evolution du "pore collapse" en fonction de S_{wr}	124
Figure 4-39 : Contrainte de rupture ("pore collapse") de craies de Lixhe soumise à essais quasi hydrostatiques, saturées en eau ou méthanol (saturations variables) (Madland, 1999).	124
Figure 4-40: Résultats typiques d'essais proportionnels sur la craie de Lixhe à différents niveaux de succion (Pasachalk, 2001)	125
Figure 4-41: surfaces de charge déterminées à partir des essais à succion contrôlée (Pasachalk, 2001)	125
Figure 4-42: Essai de fluage (rapport interne LGIH - FOR882).....	128
Figure 4-43 : essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en méthanol	128
Figure 4-44 : Essai triaxial ($\sigma_3 = 1.5$ MPa) sur craie de Lixhe saturée à l'eau. - courbe contrainte - déformation (Risnes & Nygaard, 2000)	129
Figure 4-45 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Soltrol - différentes vitesses de mise en charge.....	130
Figure 4-46 : relation entre "pore collapse" et vitesse de chargement essais isotropes sur craie de Lixhe saturée en Soltrol	131
Figure 4-47 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en eau - différentes vitesses de mise en charge.....	131
Figure 4-48 : principe de la procédure "de Waal" pour essais de fluage.....	132
Figure 4-49: Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 47.3$ %) - évolution en fonction du temps de la contrainte effective axiale (en rouge) et de la déformation axiale (en bleu)	133
Figure 4-50 :Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 47.3$ %) - contrainte effective axiale en fonction de la déformation axiale. Les lettres correspondent à celles de la figure 5-51.	134
Figure 4-51 :Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 39.4$ %) - diagramme contrainte - déformation	134
Figure 4-52 : Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 33.7$ %) - diagramme contrainte - déformation	135
Figure 4-53 : Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 47.3$ %) - Phase de "stabilisation"	135
Figure 4-54 : Essais de compression isotropes, non drainés, sur craies de Stevn's Klint saturées en eau. Diagramme $p' - q - e$ (indice des vides). (CSL = critical state line) (Leddra & Jones, 1989).....	137
Figure 4-55 : Essais d'extrusion - dispositif expérimental pour essais oedométriques (d'après Risnes, 1990)	138

Figure 4-56 : Diagramme contrainte - déformation au cours d'essais hydrostatiques d'extrusion sur craie de Lixhe saturée en eau. Diamètres des ouvertures : craie 28 :10 mm; craie 24 : 5 mm; craie 21: 2mm; en pointillés : pas d'ouverture (Risnes, 1990)	139
Figure 4-57 : Essais sur craie de Lixhe saturées avec différents mélanges eau / méthanol. Contraintes d'extrusion en fonction de la teneur en méthanol (d'après Grønås & Risnes, 1982).....	140
Figure 4-58 : Etats de désagrégation de craies de Lixhe en fonction de la déformation subie préalablement (d'après Risnes et al., 1994)	142
Figure 4-59 : modèle conceptuel des forces de liaison interparticulaire (d'après Bois, 2000).....	144
Figure 4-60 : Modèle de Risnes Les points noirs représentent les aspérités en contact qui ont été cimentées - a) forces d'attraction dues aux effets capillaires, b) forces de répulsion, d'origine électrostatique - (Risnes & Flångeng, 1999).....	145
Figure 5-1 : Comparaison entre courbes contrainte - déformation d'échantillons de craie de Lixhe saturés en différents fluides, avant et après injection de CO ₂	150

Tableaux

Tableau 2-1 Relation nature de la saumure - humidité relative - succion.....	46
Tableau 2-2 : Echelle de mouillabilité.....	51
Tableau 3-1: Echelle stratigraphique simplifiée.....	70
Tableau 4-1: Caractéristiques de la craie de Lixhe	83
Tableau 4-2 : caractéristiques des craies de la formation Ekofisk fonctions de la morphologie des grains.....	84
Tableau 4-3 : contraintes de rupture en traction - craies de Lixhe séchées à différentes températures (d'après Madland, 1999).....	109
Tableau 4-4 : Tension superficielle des mélanges eau - méthanol (d'après Handbook of Chemistry)	110
Tableau 4-5 : potentiel zeta de craie et fluides usuels (Risnes et al., 2000) ..	111
Tableau 4-6 : Essais triaxiaux sur craies de Lixhe - Modules E moyens et coefficients de Poisson (d'après Risnes & Nygaard, 2000).....	130
Tableau 5-1 : Résultats des essais d'injection de CO ₂ supercritique	151

Nomenclature

	symbole	unité - valeur - définition
accélération due à la pesanteur	g	m/s ² (=9.81)
angle de Lode	θ	radian (adimensionnel)
angle du ménisque	θ	°
célérité des ondes de cisaillement	V_t	m/s
célérité des ondes de compression	V_l	m/s
coefficient de Biot	α	adimensionnel
coefficient de consolidation	C_v	m ² /s
coefficient de perméabilité (de Darcy) conductivité hydraulique	k	m/s
coefficient de Poisson	ν	adimensionnel
compressibilité de la roche	K_b	GPa
compressibilité des grains	K_g	GPa
concentration de la solution de PEG	c	g/g d'eau
constante des gaz	R	J/mol.K (= 8.3143)
contrainte principale (totale) majeure (en général, verticale)	σ_1 S1	MPa
contrainte principale (totale) mineure (en général horizontale, aussi : pression de confinement)	σ_3 S3 p _{lat.}	MPa
contrainte principale (effective) majeure (en général, verticale)	σ'_1 S'1	($\sigma'_1 = \sigma_1 - u$) MPa
contrainte principale (effective) mineure (en général horizontale)	σ'_3 S'3	($\sigma'_3 = \sigma_3 - u$) MPa
contrainte (totale) moyenne	p	[$p = (\sigma_1 + 2 \sigma_3)/3$] MPa
contrainte (effective) moyenne	p'	($p' = p - u$) MPa
contrainte déviatorique (déviateur)	q	($q = \sigma_1 - \sigma_3$) MPa

déformation à la rupture	ε_r	adimensionnelle
déformation axiale	ε_1 , E1	adimensionnelle, exprimée en 10^{-3} (10-3), en % ou en microstrain (10^{-6})
déformation radiale	ε_3 , E3	
déformation volumique	ε_v , Ev	
hauteur limite de l'ascension capillaire	h	m
humidité relative	h	adimensionnelle (parfois exprimée en %)
indice de continuité	IC	adimensionnel
indice de mouillabilité Amott-Harvey	WI	adimensionnel
indice des vides	e	adimensionnel
masse molaire de l'eau	M	g/mol (=18.016)
masse volumique	ρ	kg/m ³
microdureté Vickers	H _v , D _v	MPa (ou en kg/mm ²)
module "d'élasticité" (cycles de charge/décharge)	E _e	GPa
module "de déformation" (de premier chargement)	E _d	GPa
module oedométrique	E _o	GPa
module de Young	E	GPa
pente élastique (plan oedométrique)	κ	adimensionnel
pente plastique (plan oedométrique)	λ	adimensionnel
perméabilité absolue	K	m ² (ou Darcy ou mD)
pois volumique ou densité apparent (e)	γ_d	densité : adimensionnelle pois volumique : kN/m ³
pois volumique ou densité des grains	γ_s	
porosité	n (Φ , η)	adimensionnelle parfois exprimée en %
porosité de pores	n_f	adimensionnelle (parfois exprimée en %)
porosité de fissures	n_p	adimensionnelle
pression interstitielle (pression de pore)	u	MPa
pression capillaire	p	MPa

pression du fluide mouillant (eau)	u_w	MPa
pression du fluide non mouillant (air)	u_a	MPa
pression du fluide non mouillant (huile)	u_o	MPa
pression de préconsolidation	p_0^*	MPa
rapport S3/S1	K_0	adimensionnel
rayon du ménisque	r	MPa
résistance en compression simple, à sec	R_{csec}	MPa
résistance en compression simple à l'état saturé en eau	R_{csat}	MPa
résistance en compression simple (UCS)	$R_c, \sigma_c,$ (ou σ_r)	MPa
résistance en traction	R_t, σ_t	MPa
saturation irréductible à l'eau	S_{wir}	adimensionnelle (parfois exprimée en %)
saturation en eau connée	S_{wi}	
saturation résiduelle en eau	S_{wr}	
saturation résiduelle en huile	S_{or}	
succion	s	MPa
température	T	K
tension superficielle	τ	N/m (parfois dyne/cm)
viscosité dynamique	μ	Pa.s (ou Poise ou cP)
vitesse de Darcy	v	m/s

1 INTRODUCTION

Bien que discrète, la craie est un matériau familier à pratiquement tout le monde. Qui, ayant plus de 5 ans aujourd'hui, n'a pas connu ce bâtonnet servant à écrire au tableau noir?

Pour beaucoup aussi, la craie ne représente que l'élément majeur des superbes paysages des falaises d'Etretat ou de Douvres.



Figure 1-1: Monet - Les falaises d'Etretat

Mais la craie est bien plus que cela et l'intérêt pour ce matériau s'est considérablement accru durant les trois à quatre dernières décennies.

Par intérêt scientifique pur, d'abord, les progrès de la paléontologie, de la sédimentologie, de la tectonique ayant permis de grandes avancées dans ces domaines.

Par intérêt économique ensuite, vu l'importance croissante de la craie comme aquifère, comme matériau de génie civil, comme matière première pour les cimenteries et autres... et surtout suite à la découverte, à la fin des années soixante, d'immenses gisements pétroliers dans les formations crayeuses du sous-sol de la Mer du Nord.

La craie est étudiée dans bien des disciplines, de la paléontologie à la pétrophysique, en passant par la tectonique et la mécanique. C'est vers ce dernier volet qu'est orienté le présent mémoire.

Du point de vue "mécanique", c'est surtout depuis la fin des années septante que l'étude de la craie est réalisée de manière plus détaillée et systématique.

Quelques grands ouvrages de génie civil, tels les remblais du port d'Antifer, la centrale nucléaire de Paluel etc. y ont contribué.

Mais c'est surtout à cause des (ou grâce aux?) énorme problèmes rencontrés dans les champs pétroliers de Mer du Nord, et spécialement sur le champ d'Ekofisk, à partir des années quatre-vingt, que les études de la mécanique de la craie ont connu un développement considérable.

Comme parallèlement, les progrès des méthodes d'études, en particulier la microscopie électronique, ont permis de pénétrer beaucoup plus loin dans la connaissance de la constitution de la craie, de nouvelles théories et de nouvelles expérimentations ont du être développées pour mesurer, rendre compte, expliquer et modéliser le comportement de ce matériau.

Au fur et à mesure des études, des facettes inconnues du comportement de la craie sont mises à jour et de nouvelles interrogations remettent bien souvent en question les hypothèses qu'on croyait fermement établies.

Aussi, ce mémoire n'a-t-il pas pour ambition de présenter un état définitif sur les connaissances de la craie en général et de sa mécanique en particulier.

Il souhaite plutôt se présenter comme un bilan de plus de 25 ans de fréquentation de la craie, dans divers domaines, principalement dans le domaine pétrolier. Pour placer la craie dans ses divers contextes, il se propose, sans entrer dans les détails, de brosser un tableau des différentes approches, nécessairement pluridisciplinaires, et de la phénoménologie du comportement de ce matériau atypique.

Ceci conduit à structurer le travail en cinq parties principales.

- la première partie concerne la craie en elle-même: sa constitution, sa répartition stratigraphique et géographique, sa structure, ses propriétés physiques et pétrophysiques générales;
- la deuxième partie pose les problèmes des réservoirs pétroliers de Mer du Nord;
- la troisième partie, la plus volumineuse, aborde le comportement mécanique de la craie comme roche réservoir;
- la quatrième partie expose certains développements en cours et considère les perspectives de développements futurs.

2 LA CRAIE

2.1 Définition

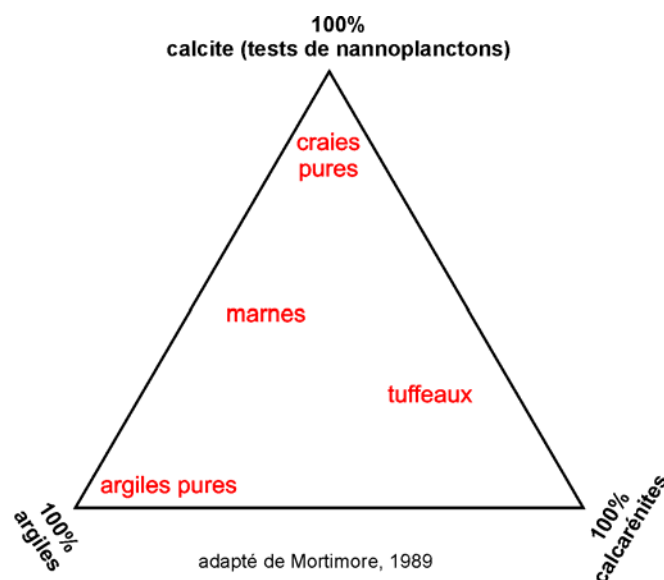
La craie peut être définie comme une roche sédimentaire, blanche (ou claire), presque exclusivement composée de carbonate de calcium, poreuse et friable.

Cependant, des variations importantes de ces critères peuvent être rencontrées (Mortimore, 1989), telles que :

- des différences de couleur: craies rouges ou rosées au Nord de l'Angleterre, craies grises du Maastrichtien supérieur à Lixhe, craies vertes du Turonien du Bassin de Paris;
- des compositions minéralogiques variables: certaines craies contiennent plus ou moins d'éléments argileux et/ou siliceux;
- des résistances (duretés) pouvant être très faibles ou assez élevées (dans le cas de "hard grounds" par exemple).

Une description plus précise de la craie peut être donnée en se référant à ses origines et à ses composants (Kennedy, 1985).

La craie est ainsi définie comme une biomicrite, friable à bien cimentée, composée principalement de débris d'algues planctoniques (*Haptophyceae*) ou nannoplanctons. Ces débris sont formés de calcite à faible teneur en magnésium. D'autres composants carbonatés, calcarénites, peuvent être présents, ainsi que des minéraux non carbonatés, argileux et/ou siliceux, phosphatés.... La craie renferme aussi des composants biogéniques carbonatés ou siliceux: foraminifères, oursins, belemnites ...,



En fonction des proportions de calcite, argiles et calcarénites, les sédiments crayeux portent des appellations différentes, définies dans le diagramme ternaire calcite - calcarénite - argile (Figure 2-1).

Par la suite, il ne sera plus question que des craies pratiquement "pures", c'est-à-dire contenant plus de 80 à 85 % de carbonates, et poreuses (> 30% de porosité).

Figure 2-1 composition des roches sédimentaires craies - marnes - argiles

2.2 Composition

2.2.1 Fossiles

Les plus petits constituants de la craie sont formés de squelettes, plus ou moins fragmentés, d'algues planctoniques (*Haptophyceae*), principalement des "coccolithophoridés". Ils représentent plus de 80% de la craie "pure".

Ces squelettes de nanoplanctons sont formés d'un assemblage de plaquettes de calcite, de dimensions de l'ordre de 0.1 μm à 1 μm .

Les algues planctoniques développent une grande variété de structures, formes et tailles de cristaux de calcite, conduisant à une grande variété de nanoplanctons, coccolithophoridés et espèces voisines (par exemple, rhabdolites, calcisphères, placolithes, *Pithonnella Nannoconnus* etc.)

Le plus fréquemment, les plaquettes de calcite sont disposées en anneaux ou rosettes, de 3 à 15 μm , appelés **coccolithes**⁵. L'utilisation du M.E.B. (Microscopie Electronique à Balayage) permet d'avoir une vision précise des coccolithes et en autorise l'étude systématique. La photo (Figure 2-2) montre l'aspect général des coccolithes.

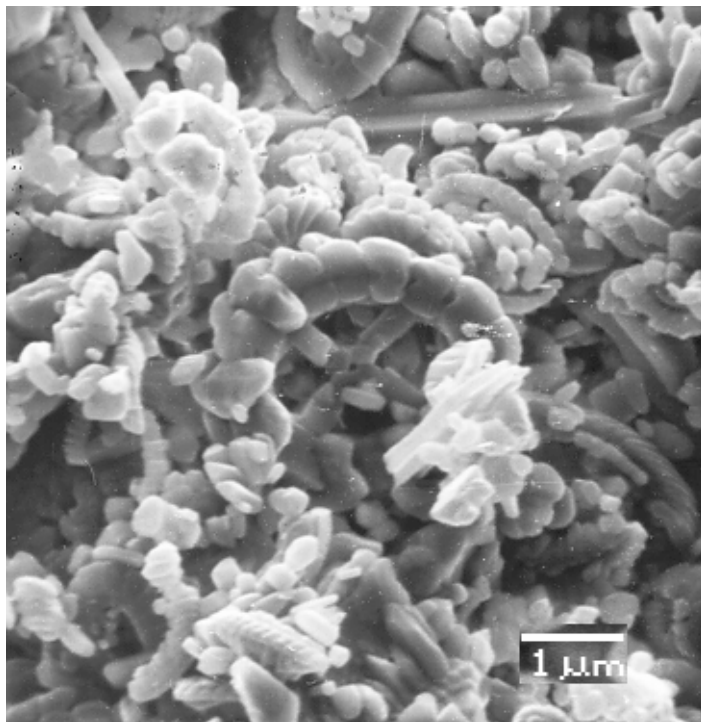


Figure 2-2 : Coccolithes et plaquettes - craie campanienne de Lixhe

⁵ Bien que le Larousse donne "coccolite" comme orthographe, nous suivons les précurseurs français, entre autres D. Noël (par ex. Noël, 1967) et M-P. Aubry (par ex. Aubry, 1975), qui écrivent "coccolithes".

A l'origine, les coccolithes formaient des coccosphères à l'intérieur desquelles se trouvaient les parties organiques du nannoplancton (Figure 2-3). Les coccosphères entières, bien conservées, sont assez rares. Le plus souvent, elles sont décomposées en leurs coccolithes constitutifs.

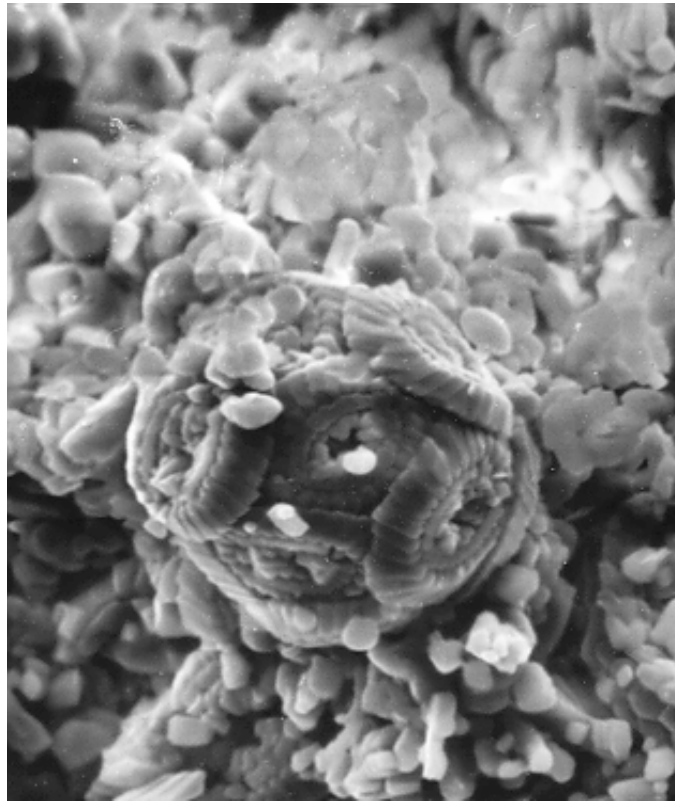


Figure 2-3 : Coccosphère (diamètre +/- 30 μm) craie campanienne de Lixhe

Selon les modes de transport et de dépôt du sédiment (de la "boue de craie"), la proportion de coccolithes entières est plus ou moins grande. Par ailleurs, en fonction de l'érosion subie, les "grains" de calcite peuvent avoir conservé leur forme rhomboédrique ou avoir été plus ou moins arrondis.

Outre les nannofossiles, les craies renferment, mais en de trop faibles proportions pour avoir une incidence sur leur comportement mécanique

- des microfossiles, principalement des **foraminifères**, de grande importance pour les déterminations stratigraphiques récentes, des ostracodes et autres;
- des (macro)fossiles, spongiaires, ammonites, radiolaires, bryozoaires, mollusques, échinides, bivalves (*Inoceramus*), belemnites...qui ont servi aux premières déterminations stratigraphiques.

Par ailleurs, bien que ce fut au Secondaire que proliférèrent les dinosaures, la présence de fossiles (marins, tels les Ichtyosaures ou l'Elasmosaurus) de très grande taille dans la craie est extrêmement rare.

2.2.2 Minéralogie

Le composant majeur de la craie, celui des plaquettes des coccolithes, est de la calcite. Cette calcite n'est toutefois pas du CaCO_3 pur mais contient une faible teneur en magnésium. La composition minéralogique des plaquettes de coccolithes, chimiquement très stable, explique le faible taux de diagenèse de la craie (voir chapitre 4).

De la silice, sous forme de grains de quartz est assez rare mais certaines craies peuvent contenir jusqu'à 25% de silice, voire plus. Des analyses à la microsonde électronique ont montré la répartition des atomes de silice dans la matrice crayeuse.

La photo (Figure 2-4) montre l'analyse par microsonde électronique (Kevex) d'un élément de craie; les points blancs indiquent la présence de silice qui se présente d'une manière uniforme et diffuse.

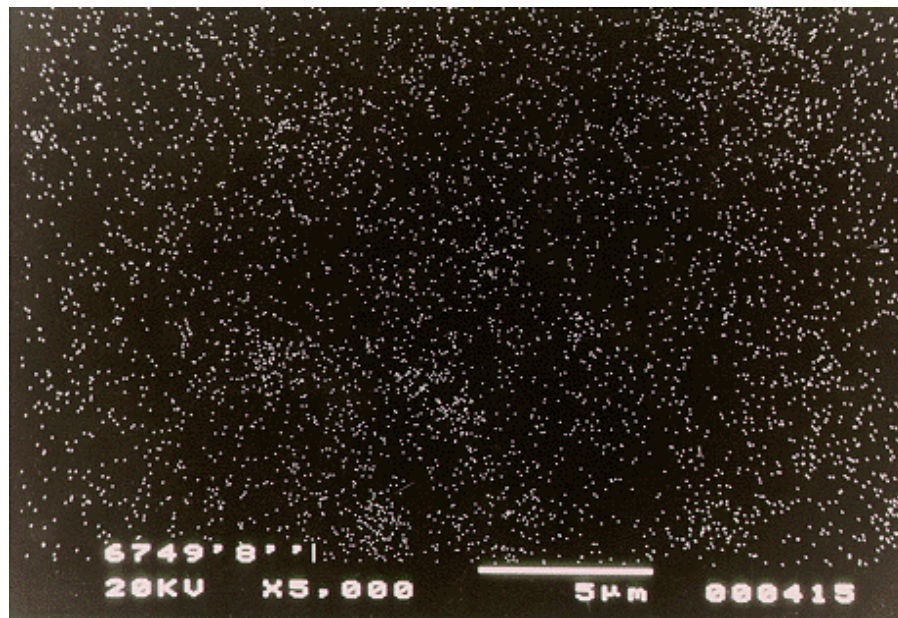


Figure 2-4 : Analyse par microsonde électronique de la silice dans un échantillon de craie du gisement d'Ekofisk (Monjoie, Schroeder et al., 1985)

La silice présente dans les craies est vraisemblablement d'origine biogénique et/ou volcanique, tout comme la silice des silex (Aubry, 1975).

Des boues calcitiques et/ou argileuses, s'ajoutent parfois aux restes de nanofossiles, formant alors des craies atypiques ou des marnes.

Certaines craies renferment du phosphate de calcium (craies phosphatées), de la dolomite et/ou d'autres minéraux accessoires, tels les feldspaths, les hydroxydes de fer, la pyrite ou la marcassite, etc.

2.3 Cadre géologique, paléo-géographique et tectonique

2.3.1 Age

Bien que dans certaines régions, des craies soient encore en formation, la plupart des craies que nous connaissons, en particulier celles qui seront étudiées ici, sont âgées de quelques 60 à 80 millions d'années.

Le terme "craie" porte en lui-même une signification stratigraphique : dès 1822, J.-B. Omalius d'Halloy a groupé les craies du bassin de Paris au sein du *système* du Crétacé (craie = *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.

Actuellement, l'étude des microfossiles et des nannofossiles, et en particulier la notion de "microfaciès"⁶ ou de "nannofaciès", a permis de détailler la stratigraphie du Crétacé et des époques ultérieures (Burnett, 1996).

Un extrait de l'échelle stratigraphique internationale couvrant la période intéressant les dépôts crayeux, du Crétacé à nos jours, est donné en annexe.

Notons que les cartes géologiques de Wallonie, en cours d'élaboration, utilisent, en plus de la biostratigraphie, une détermination lithostratigraphique qui divise les terrains en *strates*, groupées en *membres*, plusieurs membres donnant une *formation* (qui est l'unité stratigraphique de base), plusieurs formations formant un *groupe*. Il y a toutefois une corrélation assez étroite entre les limites bio et litho stratigraphiques.

2.3.2 Conditions de dépôts

Les craies sont donc des sédiments de squelettes de nannoplancton, déposés au fond de la mer. La "productivité", particulièrement importante de ces organismes, sous le climat chaud qui prévalait à la fin du Crétacé, explique les épaisseurs importantes des dépôts crayeux, parfois de l'ordre du kilomètre, (400 m maximum en Belgique) en des temps relativement courts (géologiquement parlant). L'ordre de grandeur de la vitesse de dépôt en Europe occidentale est estimé à 15 cm/1000 ans, (Håkanson et al., 1974).

Les dépôts se sont produits parfois en eaux relativement profondes mais souvent en eaux peu profondes. Cependant, (Mortimore, 1989), la fin du Crétacé correspond à une phase d'extension rapide des plaques continentales et à un niveau de la mer particulièrement élevé. Ceci a permis à des conditions de sédimentation pélagiques, normalement réservées aux océans ou à la haute mer, de se produire à l'intérieur des mers des plates-formes continentales, en Europe et ailleurs.

⁶ le "faciès" est défini comme "l'ensemble des caractères lithologiques et paléontologiques que présente une roche"

Ces transgressions sont illustrées par le schéma (Figure 2-5) qui montre ce que pouvait être le paysage de la région liégeoise à la fin du Crétacé (il y a 80 millions d'années, à 42° de latitude nord et sous un climat sec et chaud).

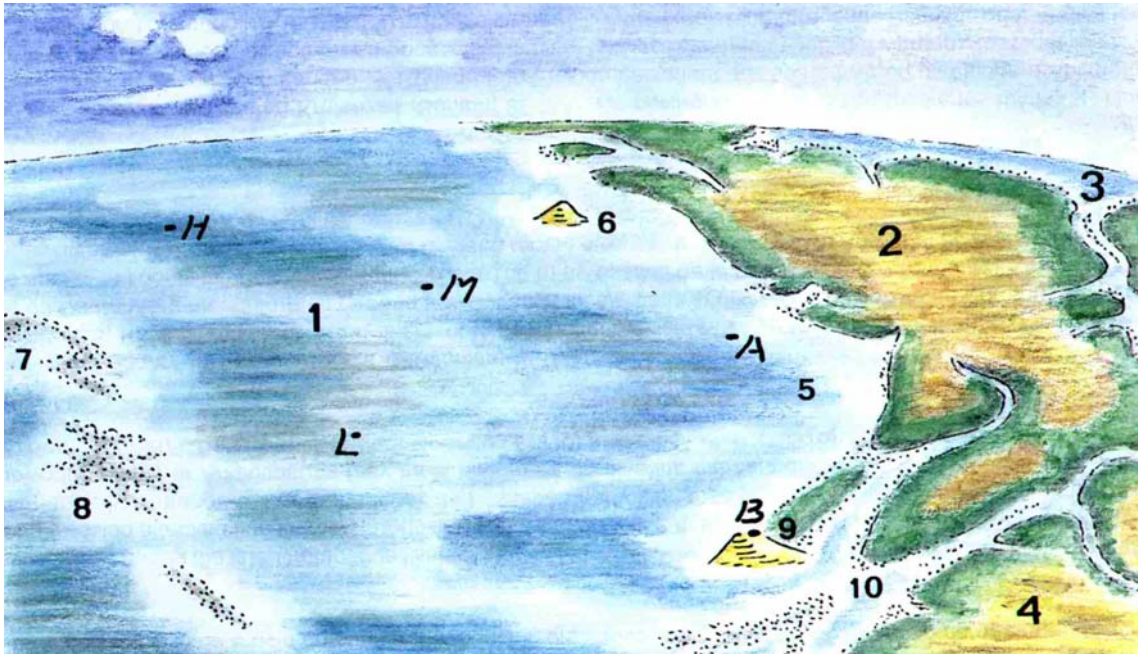


Figure 2-5 Paléogéographie de l'Euregio Meuse-Rhin au Crétacé récent (Campanien ancien; 80 Ma; 42° N; climat chaud-sec)

- 1: Mer du nord - 2: Pays de la Ruhr - 3: Baie d'Erkelenz - 4: Plaines de l'Eifel
5: Baie d'Aachen - 6: Falaise de Puth - 7: Haut-fond de Velm
8: Haut-fond de Warnant - 9: Péninsule de Botrange - 10: Petit Estuaire.
H : Hasselt - M : Maastricht - A : Aachen - L : Liège - B : Botrange
Extrait de Bless & Fernandez-Narvaiza, (1995) (d'après Arnold et al., (1978),
Kimpe et al. (1978), Kemper (1987) et Bless et al. (1991)).

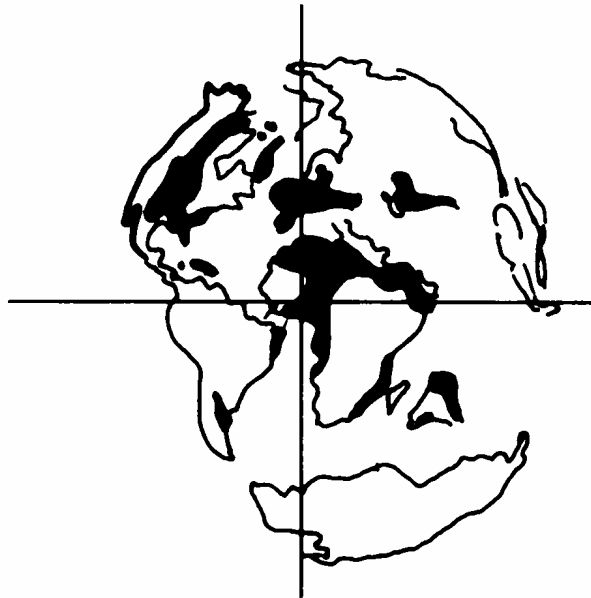
Certains dépôts de craie, en particulier les craies du graben central de Mer du Nord, sont formés de craies *allochtones*, c'est-à-dire de sédiments qui ont été déplacés de leur lieu de dépôt d'origine, par glissement, coulées de débris, courants de turbidités ou autres mécanismes.

Les circulations océaniques, les variations du niveau de la mer et climatiques, les surrections ou subsidences tectoniques, les associations d'espèces de coccolitophoridés et autres nannoplanctons, etc., expliquent les importantes variations de lithofaciès des craies à travers le monde.

2.3.3 Répartition des gisements crayeux

Les formations crayeuses de la fin du Crétacé, ont recouvert des régions actuellement éloignées de plusieurs milliers de kilomètres. A l'époque des dépôts, le continent laurasien est encore relativement compact bien que la dérive des continents provoque la séparation rapide de ses composants.

La figure ci-dessous (Figure 2-6) montre la localisation des plates-formes continentales affectées par les transgressions du Crétacé récent.



*Figure 2-6 : Extension des transgressions du Crétacé récent (zones noires)
Mortimore (1989) d'après Briden (1977) et Hancock & Kaufmann (1979)*

Actuellement, la craie est donc rencontrée dans le monde entier, principalement dans l'hémisphère nord.

C'est ainsi qu'on la trouve en Europe, dans le bassin Anglo – Parisien qui se prolonge jusqu'en Belgique et jusqu'en Irlande, en Mer du Nord et dans le couloir dano-polonais

La répartition des craies en Europe occidentale au Crétacé (Figure 2-7) en explique la répartition actuelle.

Ailleurs, la craie existe en Ukraine, Georgie, Kazakhstan, entre la mer Noire et la Caspienne, en Israël, au Sinaï, en mer Ionienne, en Afrique du Nord, aux Caraïbes, aux Bahamas, dans le golfe du Mexique, au Centre des Etats - Unis, sous forme d'un grand bassin etc...

Dans l'hémisphère Sud, la craie est relativement rare en affleurement. On la trouve surtout en Australie occidentale, dans le bassin de Perth. Cependant, des formations de craies existent dans le fond des océans et le Deep Sea Drilling Project (DSDP) a repéré plusieurs gisements dans l'hémisphère Sud.

La carte générale (Figure 2-8) donne les localisations actuelles des dépôts crayeux dans le monde, y compris les endroits en cours de sédimentation et les points de recherche du DSDP.

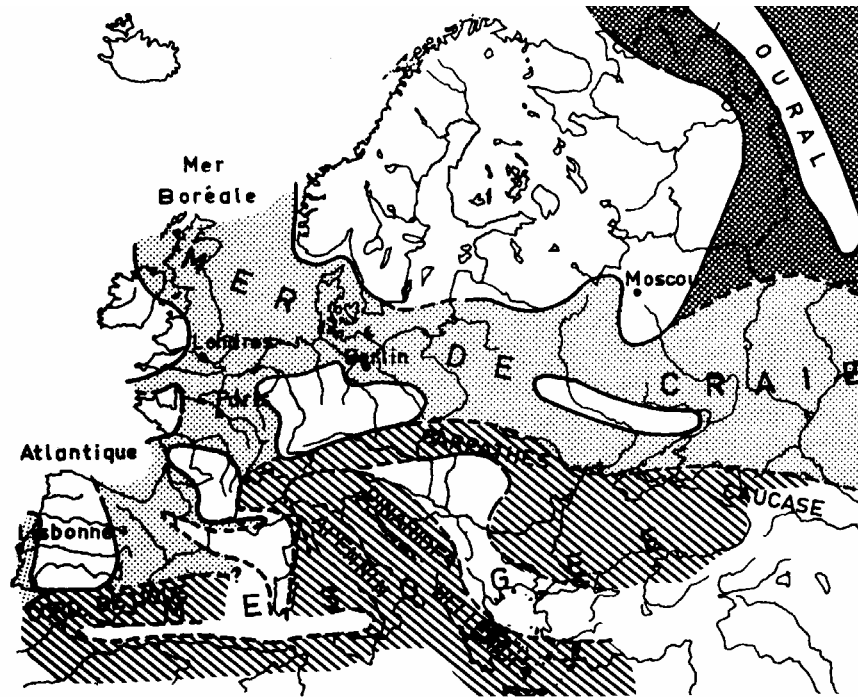


Figure 2-7 Répartition des craies en Europe au Crétacé
 En blanc, les zones émergées; en grisé clair au centre, les dépôts du Cenomanien, au nord, les dépôts du Senonien, au Sud, zone de sédimentation profonde (flysch). Extrait de Tallon (1976), d'après Aubouin, (1968)



Figure 2-8 : Répartition de la craie dans le monde
 En grisé : zones d'affleurement; les numéros indiquent les forages du DSDP d'après Mortimore (1989)

2.3.4 Tectonique

La craie s'est déposée au Crétacé supérieur et à la base du Tertiaire dans une mer épicontinentale en zone de plateforme. Elle se trouve ainsi en dehors des zones concernées par la tectonique alpine plicative et n'a donc, de ce fait, pas subi de phase de plissement marqué. En général, les dépôts de craies sont subhorizontaux, avec quelques exceptions : synclinaux et anticlinaux à très grands rayons de courbures.

Ces "ondulations" (plutôt que plissements) sont en relation géométrique avec les structures crustales sous-jacentes héritées de la tectonique hercynienne. C'est, entre autres, le cas par exemple sur le tracé du tunnel sous la Manche (Figure 2-9) dans le Boulonnais où les grandes ondulations se sont superposées d'une part aux structures hercyniennes et, d'autre part, ont été ensuite induites par une dynamique liée à la zone de cisaillement Nord-Artois qui y est également active (Colbeaux, 1974).

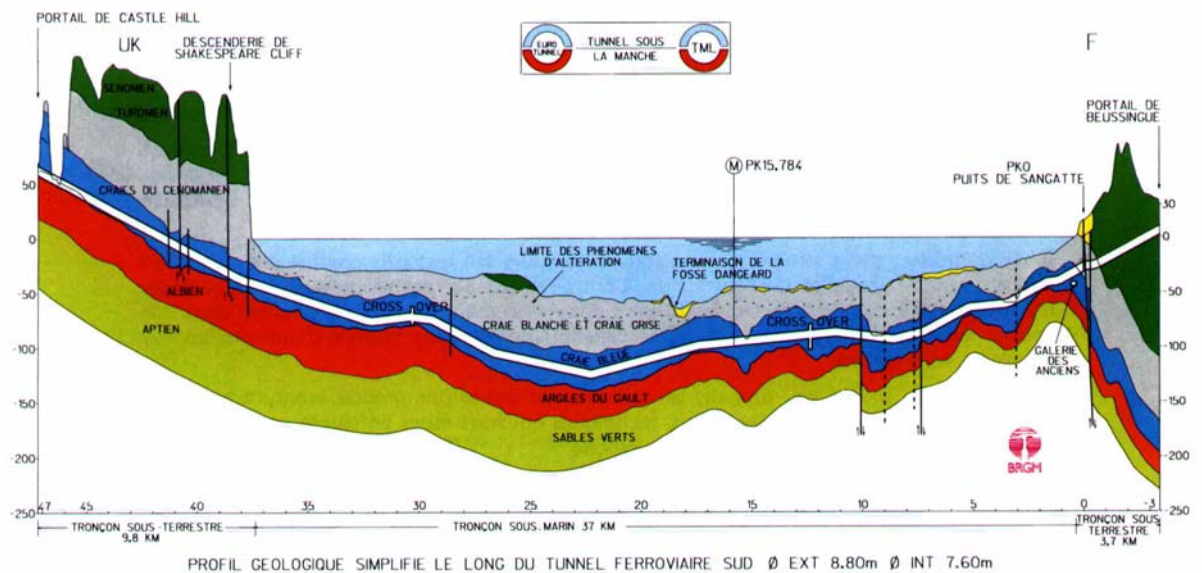


Figure 2-9: Tunnel sous la manche - profil en long (D'après document BRGM)

Les ondulations peuvent aussi être dues à l'halokynèse, dans le cas des champs pétroliers de Mer du Nord. (voir chapitre 3) ou à des événements morphologiques particuliers, comme dans le cas des craies de l'île de Moon au Danemark où la déformation plicative est provoquée par l'effet de glaciers venant de la Baltique.

Les propriétés mécaniques de la craie (qui seront examinées plus loin) sont telles qu'elle réagit rapidement aux sollicitations tectoniques, par rupture fragile à faibles niveaux de contraintes. Ceci explique l'abondance des fractures, surfaces de cisaillement, failles et joints qui résultent ainsi d'un enregistrement complexe des paléo-contraintes pour lequel les corrélations entre marqueurs tectoniques est parfois délicat à l'échelle régionale (Vandycke, 1992).

Très schématiquement, la tectonique sur la plate-forme européenne peut être résumée comme suit (Vandycke, 1992, Bergerat et Vandycke, 1994): les forma-

tions de craie se situent dans une zone de *relai* entre le rift medio-atlantique en ouverture, induisant une dynamique en extension et le domaine alpin et téthy-sien en compression.

Il en résulte une succession de champs de contraintes en extension E-W, N-S, NW - SE et NE - SW où cette dernière orientation est la plus marquante et toujours la plus active actuellement (Camelbeeck and Van Eck, 1994), et en compression N - S et NE - SW à certaines périodes particulières du Crétacé.

Ceci explique pourquoi, bien que la tectonique soit principalement d'extension partiellement synsédimentaire (Vandycke, 1992), avec des failles normales, certaines périodes d'*inversions* conduisent à des cisaillements, décrochements et failles inverses, les deux phénomènes prenant alternativement le pas l'un sur l'autre ou jouant simultanément.

La carte schématique ci-dessous (Figure 2-10) présente les grands ensembles structuraux méso-cénozoïques du Bassin Parisien et des zones voisines avec les principales orientations de compression et d'extension (Vandycke, 1992, Bergerat et Vandycke, 1994).

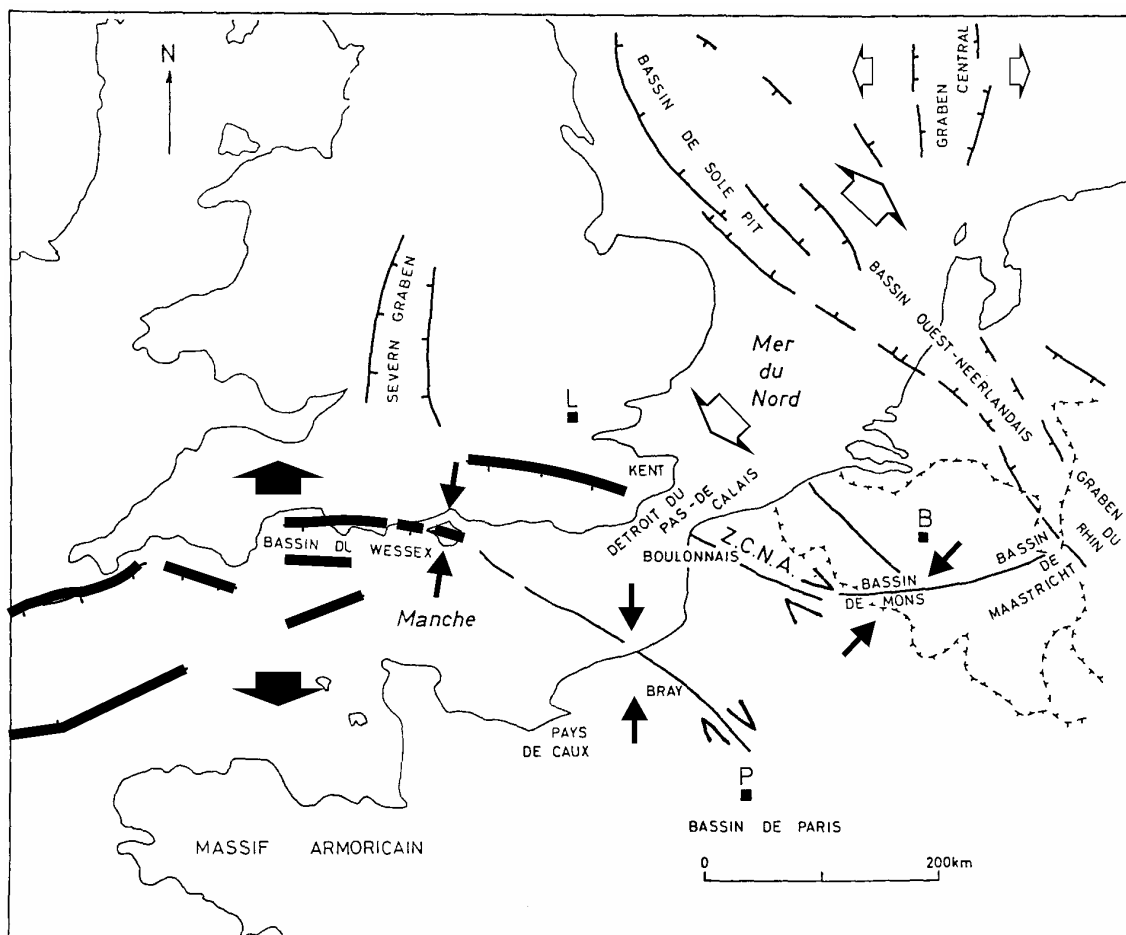


Figure 2-10: Carte schématique des grands ensembles structuraux méso-cénozoïques du Nord-Ouest européen. L : Londres, P : Paris, B: Bruxelles, Z.N.C.A.: Zone de Cisaillement Nord-Artois. Les flèches indiquent les orientations des contraintes majeures (d'après Vandycke, 1992)

En Mer du Nord, outre l'halokynèse, les principaux événements structuraux depuis le Jurassique jusqu'au présent sont indiqués au schéma ci-dessous (Figure 2-11).

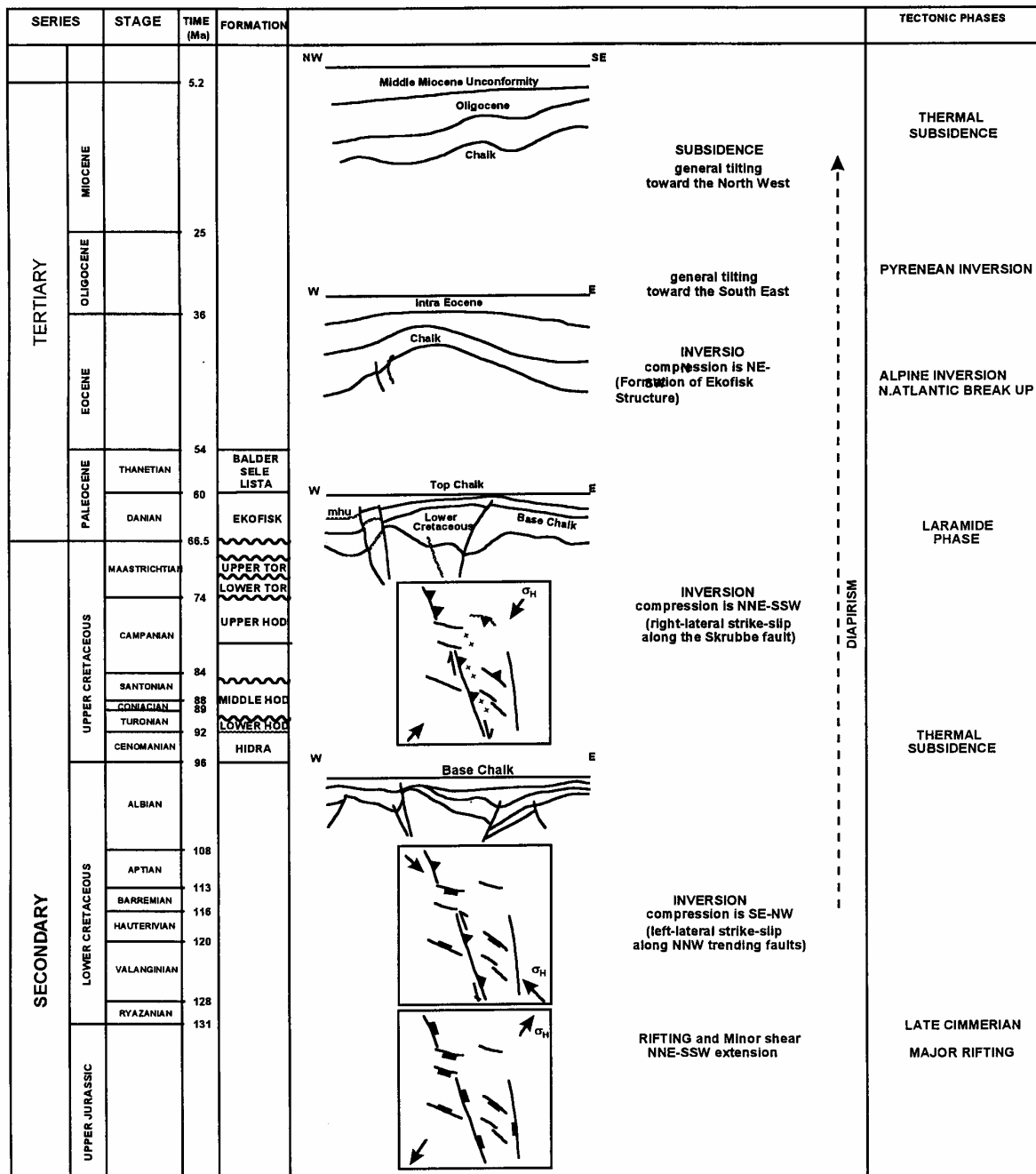


Figure 2-11: Principaux événements structuraux de Mer du Nord, du Jurassique au présent. (d'après Caillet et al., 1996).

2.4 Structure et pétrophysique

2.4.1 Structure

La photo au Microscope Electronique à Balayage (MEB) (Figure 2-12) montre la complexité de la structure de la craie. On y distingue un coccolithe entier, des grains rhomboédriques dont certains peuvent être de la calcite recristallisée (Le Roux, 1973) et des plaquettes de coccolithes brisés. Ces éléments seront appelés "grains de calcite" dans la suite .

Aucune orientation préférentielle n'est visible, comme sur pratiquement tous les échantillons examinés, quelle que soit l'orientation par rapport à la stratification.

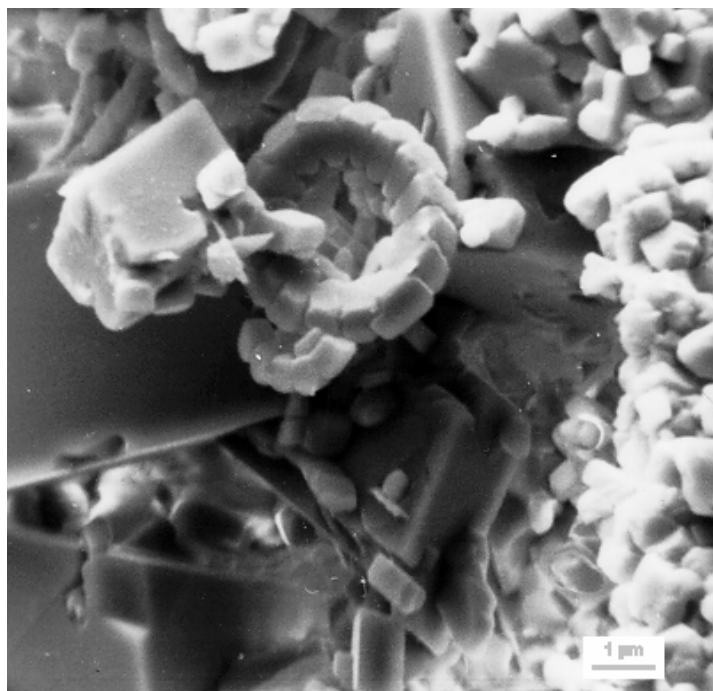


Figure 2-12 : Structure d'une craie (Ekofisk formation Tor) - vue au MEB

Cette image montre clairement la forte hétérogénéité du matériau, surtout en ce qui concerne les constituants.

Cependant, dans l'étude des craies, il est important de préciser que ces hétérogénéités locales, à l'échelle microscopique, n'affectent pas l'homogénéité globale, à l'échelle macroscopique, du matériau. C'est du reste là que réside la difficulté de l'étude de la modification de la structure après déformation de la craie lors d'essais mécaniques. Il n'est en effet pas possible, pour des raisons évidentes de fabrication de l'échantillon à observer, de visualiser un même endroit d'un échantillon avant et après essai. Tout au plus peut-on prendre des images MEB d'échantillons testés mais qui, en raison du manque d'éléments de comparaison et de l'hétérogénéité microscopique, ne permettent pas de visualiser des phénomènes tels que bandes de cisaillement, sauf cas exceptionnel (fracture au sein d'un foraminifère par exemple).

L'examen au MEB montre aussi la juxtaposition des différents éléments. La connaissance des forces de liaison entre eux est fondamentale pour la compréhension du comportement mécanique.

Les fragments de nannofossiles sont liés par adhérence ou coalescence (Tallon, 1976). Par coalescence, il faut entendre une fusion partielle de deux éléments de manière qu'ils n'en forment plus qu'un. Les liaisons par adhérence résultent des accrochages ioniques réalisés par les deux systèmes cristallins, les relativement grandes surfaces de contact entre plaquettes de nannoplanctons favorisant l'existence des forces d'adhérence.

En ce qui concerne les liaisons entre les autres éléments (morceaux de coccolithes brisés, assemblages de coccolithes entre eux), les examens au MEB ne semblent pas pouvoir apporter une réponse définitive à la question de la nature des forces de liaison entre éléments. La nature de ces forces fait l'objet de discussions depuis de très nombreuses années. Déjà en 1973, (Le Roux, 1973), est émise l'hypothèse de l'existence de "ponts de calcite" soudant entre eux les "grains de calcite". La photo au MEB (Figure 2-13) montre un point blanchâtre (toutefois assez peu visible) qui pourrait être un de ces "ponts de calcite".

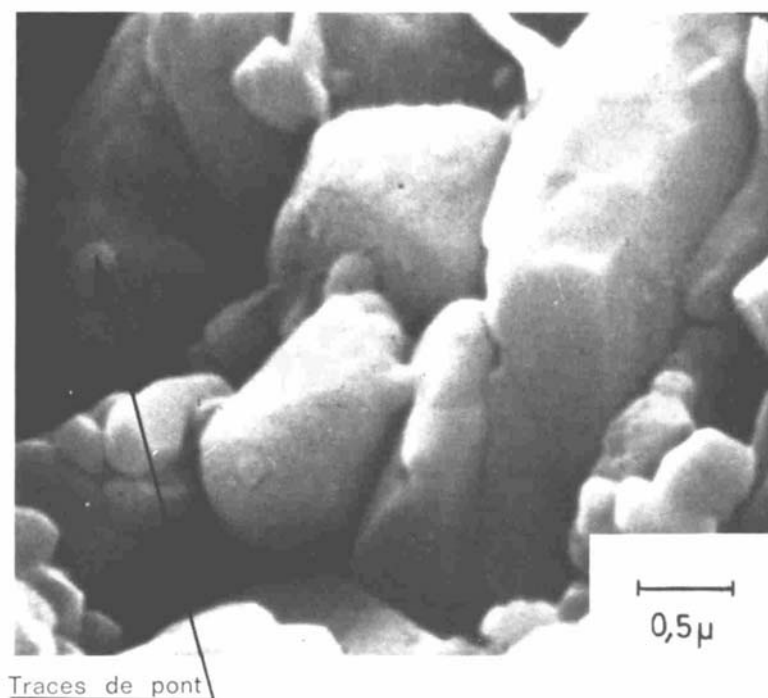


Figure 2-13 : Photo MEB de "grains " et "pont de calcite" (Le Roux, 1973)

Pour Le Roux, le carbonate de calcium qui a donné naissance à ces ponts provient des grains voisins par dissolution et recristallisation aux points de contact entre grains. Cette théorie est développée depuis par plusieurs auteurs (par exemple, Djebbi, 1984)

Tout récemment, cette hypothèse a été reprise et des photos telle celle ci-dessous (Figure 2-14), montrant de semblables "ponts" ont été publiées (Mata, 2001). Ces "ponts" sont néanmoins assez peu fréquemment détectés.

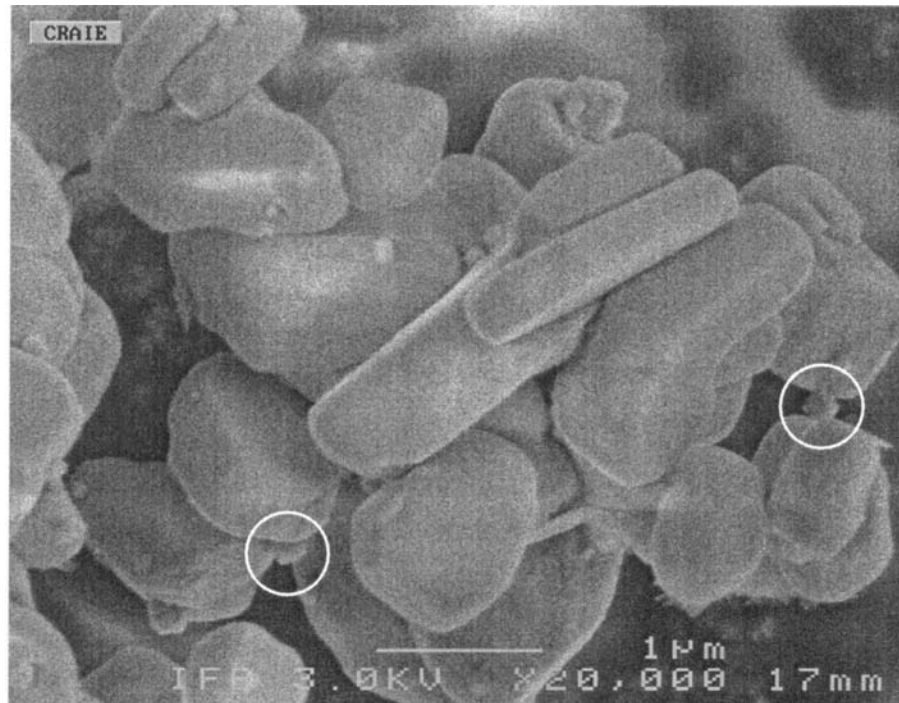


Figure 2-14 : Contacts solides (entourés d'un cercle) entre "grains" (Mata, 2001)

Si la craie contient des particules argileuses, celles-ci ajoutent leur action aux phénomènes précédents mais comme dans les craies envisagées ici, la proportion d'argiles est très faible, le rôle de celles-ci n'est pas prépondérant. Toutefois, certains modèles phénoménologiques, discutés plus loin, le prennent en compte (Bois, 2000).

Comme signalé plus haut, la diagenèse des craies est assez limitée et les particules néoformées peu abondantes. Leur rôle ne doit cependant pas être négligé et certains modèles les incluent explicitement (Risnes et al, 1999).

Enfin, ce qui n'apparaît pas au MEB, en raison de la technique de métallisation sous vide⁷, est le rôle des interactions entre les particules solides et le ou les fluides interstitiel(s). Les mécanismes d'action de ces forces de liaison (mouillabilité / succion) seront discutés plus loin .

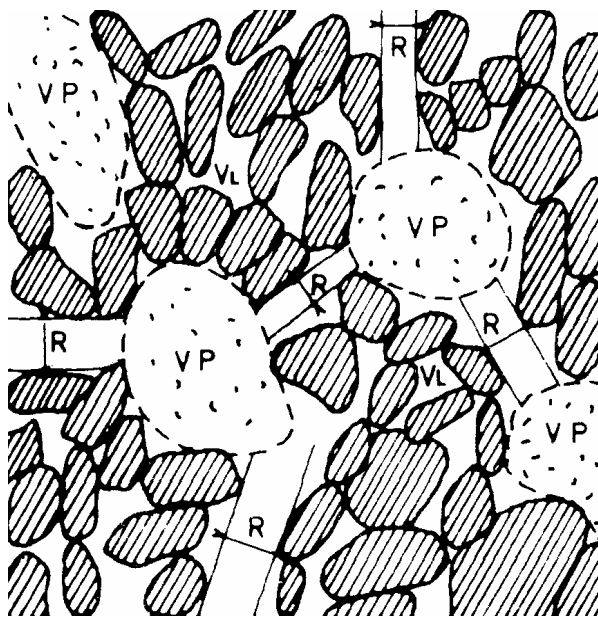
Dans tous les cas, la craie, telle qu'elle apparaît au MEB, est typiquement un *milieu granulaire*, qui peut donc être étudié comme tel.

⁷ les microscopes électroniques à balayage de type "cryogénique" ou "environnemental" permettent de pallier cet inconvénient mais leur emploi est encore (relativement) limité. Ces techniques seront abordées plus loin.

2.4.2 Porosité

Les photos au MEB montrent nettement l'importance de la porosité (entre 30 et 50%) pour la plupart des craies pures. Bien entendu, il s'agit ici uniquement de la porosité matricielle, les photos au MEB ne donnant aucune indication sur la porosité de fissures présente dans le massif.

Les images au MEB montrent aussi que la répartition granulométrique des pores est très étalée : depuis des interstices de quelques fractions de microns jusqu'aux pores de plusieurs dizaines de microns (les vides internes aux microfossiles, pouvant aller jusqu'aux millimètres, considérés comme anomalies locales, ne seront pas pris en compte ici).



Le volume poreux peut être schématisé (Tallon, 1976) comme présenté ci-contre (Figure 2-15).

Il est composé d'un volume V_p de "gros" pores, de 1 à 5 μm selon les craies, de formes assez convexes avec un rayon d'entrée plus petit que le rayon des pores et d'un volume poreux restant, V_l de dimensions inférieures à 1 à 2 μm et de formes variées.

Le rayon d'entrée, r , des pores convexes est le diamètre du plus gros passage (capillaire) permettant d'accéder au pore considéré.

Figure 2-15 Types de pores et rayons d'entrées (d'après Tallon, 1976)

L'étude de la porosité peut se faire par différentes méthodes, parmi lesquelles

- la détermination indirecte, de la porosité totale, déduite des masses volumiques sèche et à saturation
- l'analyse d'images
- la tomographie aux rayons X
- la mesure directe par porosimétrie au mercure haute pression (la porosimétrie au mercure basse pression ne s'applique pas très bien aux craies en raison de la dimension des pores)
- la mesure de la surface spécifique, qui apporte des informations complémentaires

2.4.2.1 détermination indirecte

La méthode la plus simple et la plus rapide de détermination de la porosité totale d'une craie pure est de confectionner une éprouvette "parfaitement" cylindrique (une précision de 1% sur les dimensions, diamètre et longueur est

plus que largement suffisante) de manière à en connaître le volume avec une bonne précision⁸. L'éprouvette est séchée jusqu'à poids constant, suivant la procédure utilisée en géotechnique, et pesée. Ayant ainsi la densité sèche, γ_d , et connaissant la densité de la calcite (composant à plus de 85 %), γ_s , on obtient une bonne estimation de la porosité, n^9 , du matériau:

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

La valeur de γ_s des grains de craie, déterminée au picnomètre par différents auteurs (e. a. Tallon, 1976, Doremus et Henry, 1984), varie entre 2.70 et 2.72.

La variation autour de la valeur moyenne, de 2.71, provient vraisemblablement du caractère plus ou moins dolomitique de la calcite formant les coccolithes et/ou suite à la présence, au sein des "grains", de quelques composants plus denses, minéraux des argiles, silice etc.. (la différence n'est toutefois que de l'ordre du pourcent).

2.4.2.2 analyse d'images

Les images prises au MEB se prêtent bien à l'analyse d'images. Cependant, cette méthode est très délicate à mettre en œuvre compte tenu de la variété des formes de pores et de l'effet tridimensionnel.

Des approches fructueuses ont été effectuées récemment (Gaviglio et al., 1997), basées sur la méthode "des milieux poreux reconstitués" (Adler, 1994). Les images prises au MEB ont été traitées manuellement, en suggérant les limites des vides et les intersections entre eux (une analyse de la dépendance des résultats en fonction de l'opérateur a été faite). L'image au MEB étant transformée en champ booléen, le traitement statistique permet de calculer la porosité puis de reconstruire un modèle de distribution de porosités en 3D .

Toutefois, la méthode s'avère lourde à utiliser et au stade actuel, ne peut être employée que dans des cas exceptionnels (Pirard, 1992).

2.4.2.3 tomographie aux rayons X

Pour déterminer la compacité (la densité) d'un échantillon, la tomographie par scanner aux rayons X, issue de l'imagerie médicale, est de plus en plus utilisée depuis le début des années '90.

Cette technique, s'est étendue et est actuellement appliquée à des échantillons soumis à contrainte en cellule triaxiale. L'aspect quantitatif n'est pas encore très précis mais le grand avantage est de pouvoir visualiser la distribution des porosités dans l'éprouvette et de caractériser l'homogénéité de l'échantillon.

La porosité peut s'apprécier directement sur l'image radiologique ou se déduire de la différence entre deux images d'une même section sèche ou saturée

⁸ On peut aussi, au lieu d'une éprouvette cylindrique, mesurer le volume de l'échantillon par immersion dans le mercure, par pesée après paraffinage etc.

⁹ comme en mécanique des sols et des roches, la porosité est notée "n". Dans la littérature, on rencontre aussi parfois "η" ou "μ". Les pétroliers utilisent exclusivement la notation "ϕ".

en eau (Mata, 2001). Sur les photos (Figure 2-16) qui montrent la répartition des porosités dans une section de craie obtenue par cette technique, on distingue un forte hétérogénéité locale (présence d'un élément tel qu'un foraminifère) et une hétérogénéité générale assez marquée.

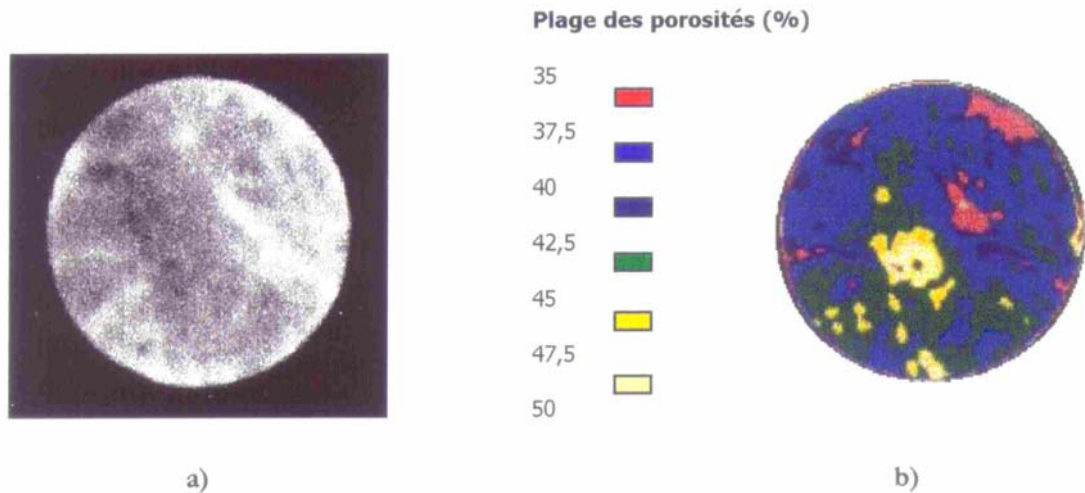


Figure 2-16 : exemple de tomographie de densité au scanner à rayons X
a) section radiologique b) porosité obtenue par différence d'images (Mata, 2001)

2.4.2.4 porosimétrie au mercure haute pression

Cette technique est basée sur la loi de Jurin

$$P = \frac{2 \cdot \tau \cdot \cos \theta}{r}$$

où P : pression capillaire, τ : tension superficielle, θ : angle du ménisque
r : rayon du tube capillaire

La tension superficielle du mercure à 25°C est de 0.48 N/m¹⁰, l'angle de raccordement du ménisque à la paroi des matériaux carbonatés ou silicatés étant de l'ordre de 140°.

La technique consiste à soumettre l'échantillon à une pression de mercure croissante, par incréments, et à mesurer le volume de mercure pénétrant l'échantillon, en fonction de chaque pression appliquée. La loi de Jurin permet de lier les valeurs des pressions appliquées à un rayon de pore ou plutôt au rayon du conduit le plus grand d'entrée du pore, aussi appelé *rayon d'entrée*.

A la fin du cycle de compression, la pression du mercure est progressivement relâché et le volume ressorti de l'échantillon à chaque palier est mesuré.

¹⁰ il s'agit aussi de la valeur de τ pour le couple mercure / air. Pour le couple eau / air, $\tau = 0.07$ N/m, pour le couple huile / air, τ varie de 0.01 à 0.05 N/m en fonction de la température.

Le processus d'injection puis d'éjection du mercure est considéré comme *non destructeur* de la texture, dans les limites des dimensions de pores généralement analysées.

Les résultats de l'essai se présentent d'abord sous forme de diagrammes volume / pression ou plutôt volume / rayon de pore (Figure 2-17).

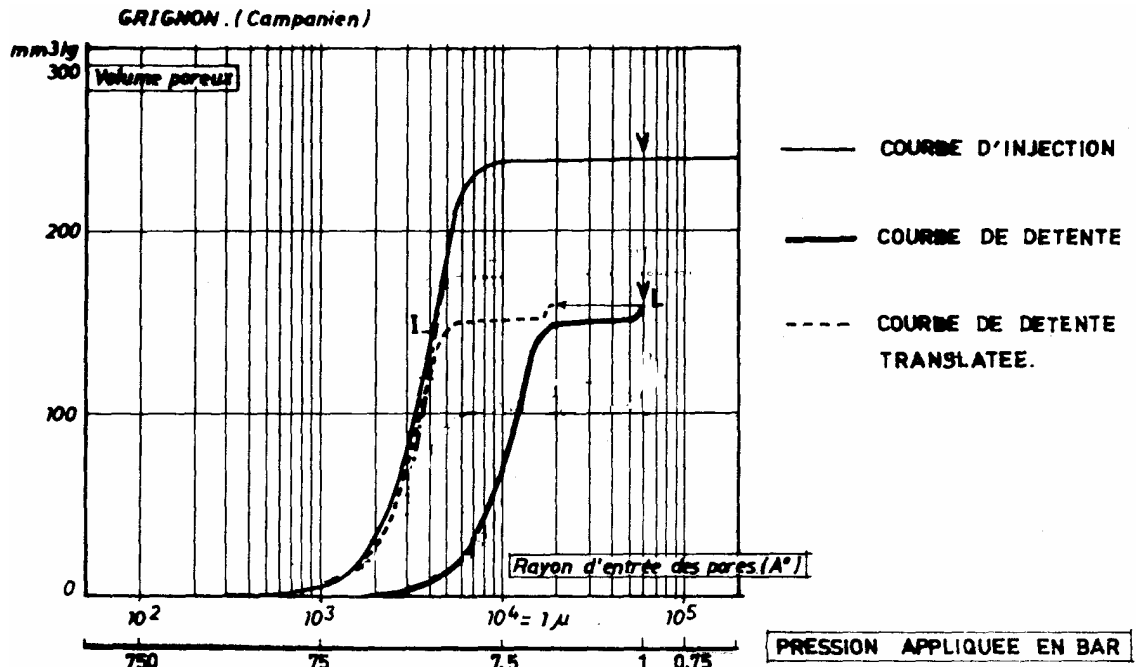


Figure 2-17 Courbes porosimétriques - craie campanienne (Tallon, 1976)

Les courbes "d'imbibition et drainage" montrent un phénomène d'hystérésis, similaire (bien qu'inverse) à celui des courbes de rétention dont il sera question plus loin. Pour tenir compte de ce phénomène dans l'interprétation en terme de rayon d'entrée, la courbe de détente est translatée.

A la fin de l'essai, lorsque la pression de mercure est revenue à la pression atmosphérique, il subsiste un "volume piégé" caractéristique.

L'interprétation des courbes porosimétriques (forme, modalité, inflexions), d'injection et d'éjection (ou "de détente"), fournit les informations sur la morphologie des vides de l'échantillon.

Une comparaison entre les porosités calculées par la méthode globale et celle déterminée par porosimétrie au mercure haute pression montre que les valeurs obtenues sont assez identiques (écart de quelques pourcents au maximum). Cependant les mesures au mercure sont en général inférieures à celles calculées, ce qui tendrait à dire (Tallon, 1976) que le mercure n'atteint pas les pores de plus petites dimensions, correspondant à la partie V_I du volume poreux.

Notons que la réalisation de deux cycles successifs de montée en pression permet (Doremus & Henry, 1985) de déterminer la surface spécifique du matériau.

Les courbes porosimétriques interprétées sont traduites en courbe de porosité / rayon (ou diamètre) d'entrée de pores, cumulatives ou différentielles, telles que présentées ci-dessous (Figure 2-18).

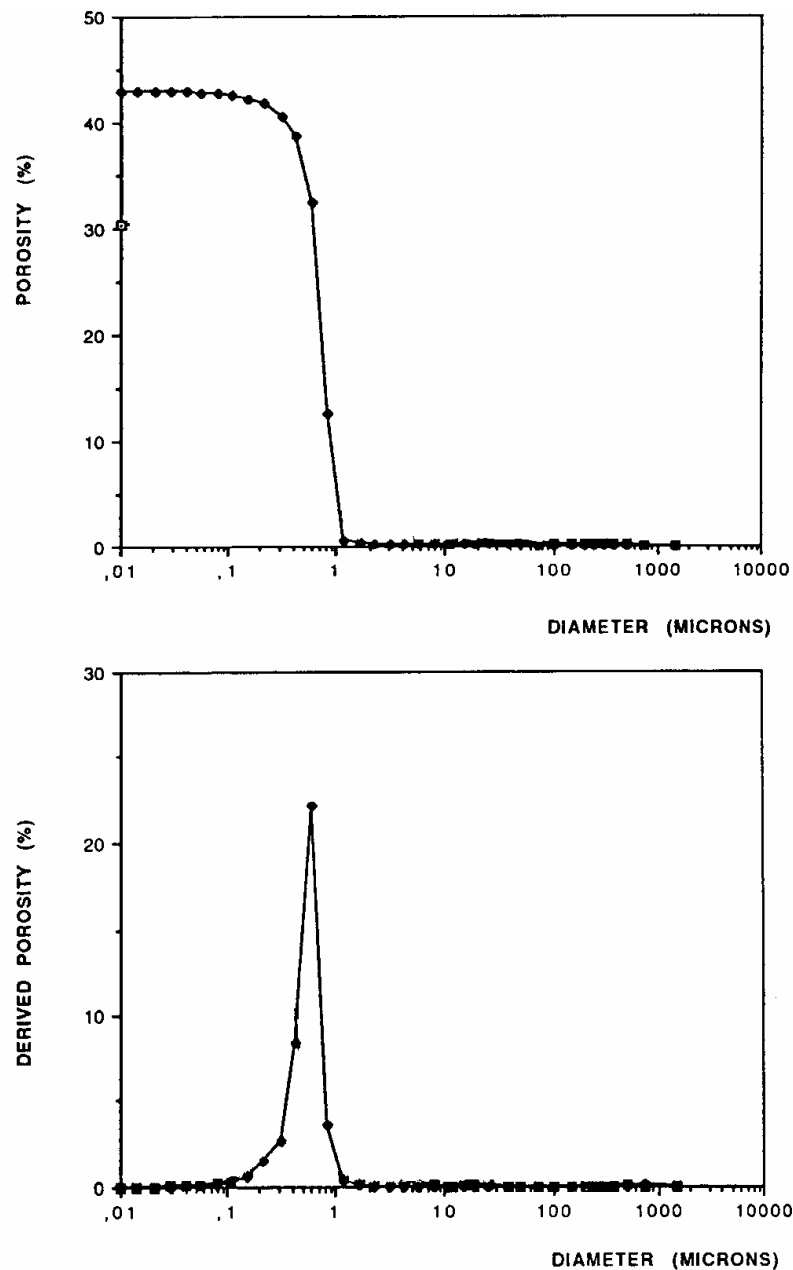


Figure 2-18 : Courbes d'injection de mercure dans un échantillon de craie campanienne du bassin de Mons (Gaviglio et al., 1997)

On voit que la craie campanienne, à l'instar de la plupart des autres craies d'ailleurs, renferme des pores dont les conduits d'entrées ont des diamètres approchant le μm (entre 0.8 et 1.2 μm dans l'ensemble).

Quelques exemples de courbes de répartition des pores mesurées sur différents types de craies françaises (Masson, 1973) sont présentés ci-après (Figure 2-19).

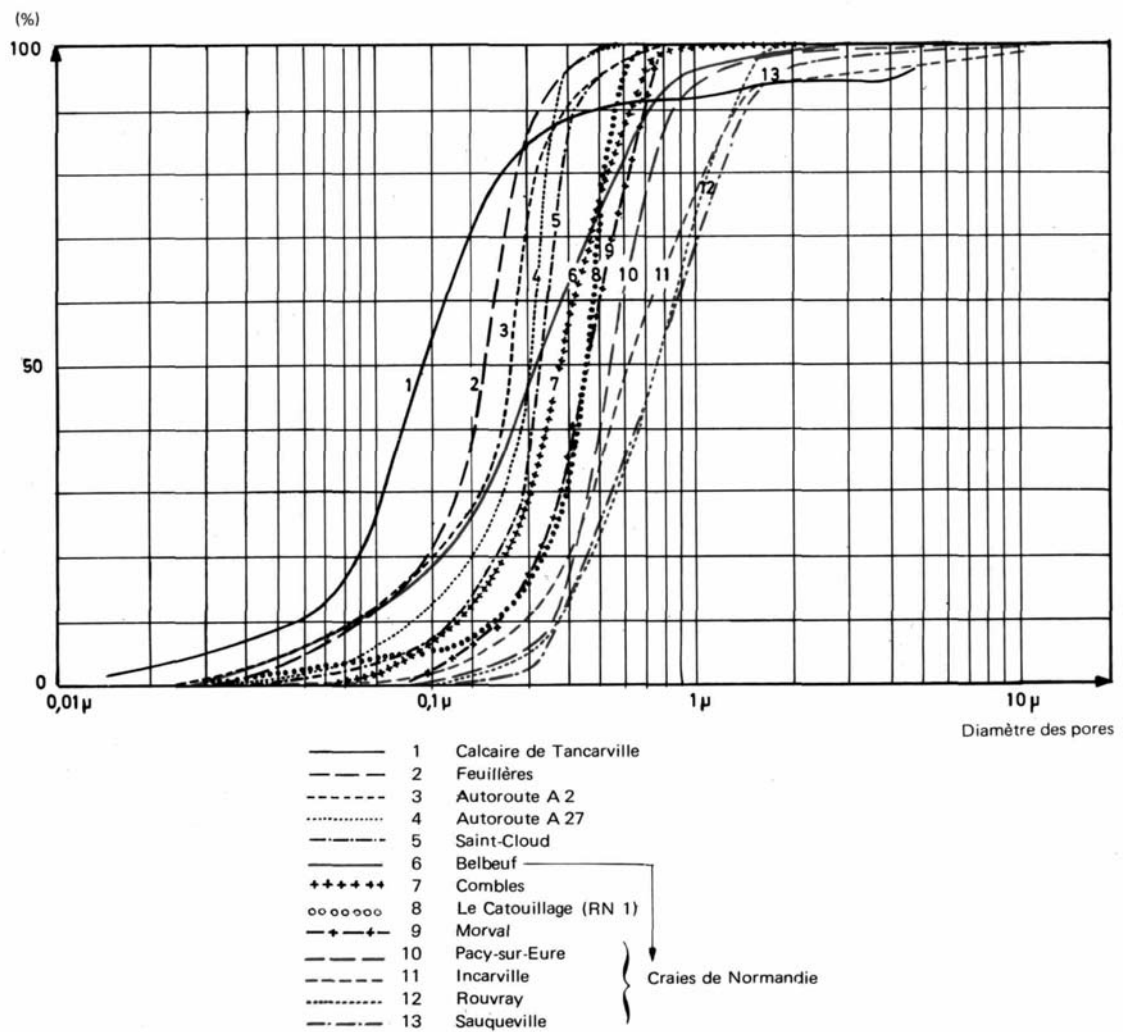


Figure 2-19 courbes de répartition des pores mesurées sur différents types de craies françaises (d'après Masson, 1973)

On constate que les "fuseaux granulométriques" ne diffèrent pas beaucoup, sauf pour certains matériaux atypiques, tel l'échantillon 1 qui est un calcaire.

En l'absence de mesure directe, une première approximation de la valeur du rayon d'entrée peut donc être prise à 0.5 μm .

2.4.2.5 surface spécifique

La mesure de la surface spécifique par la méthode BET¹¹ ne renseigne pas directement sur la taille des pores bien que les deux paramètres soient étroitement liés.

Son principe est de mesurer la quantité de gaz condensé à la surface d'un échantillon (sous faible pression 5 à 25 cm de mercure et à basse température, par refroidissement à l'azote liquide, à -196°C). La quantité condensée correspond à l'absorption de couches moléculaires de gaz à la surface du matériau et dépend de la pression et de la température du gaz à condenser. Le gaz utilisé est en général de l'azote mais on utilise aussi de l'argon ou du krypton.

L'essai consiste à refroidir une quantité définie de gaz et à le mettre en contact avec l'échantillon à des pressions croissantes. A chaque palier de pression, la quantité de gaz absorbé est déduite du produit pression x volume. L'isotherme d'absorption ainsi déterminée permet de calculer la surface spécifique.

Pour les craies pures, composées de plus de 85% de calcite, la surface spécifique est de l'ordre de 1.5 à 2 m²/g.

Pour les craies à composants argileux, la surface spécifique peut être plus élevée (jusqu'à 10 m²/g), en raison de l'importante surface spécifique des argiles (10 à 30 m²/g pour de la kaolinite et plusieurs centaines de m²/g pour de la montmorillonite).

¹¹ du nom de ses inventeurs Brunauer, Emmet et Teller

2.5 L'eau dans les craies

2.5.1 Types d'eaux -répartition

La question de l'eau dans la craie est fondamentale, les interactions entre ce fluide et la matrice rocheuse étant les phénomènes fondamentaux qui conditionnent le comportement mécanique.

Il est admis en général qu'il existe plusieurs types d'eau, définis par leur mode et l'intensité de leurs liaisons, distinguables en fonction de leur température d'élimination :

- eau interstitielle, ou eau libre, s'éliminant totalement vers 100°C. C'est cette eau qui donne la "teneur en eau" au sens géotechnique;
- eau capillaire, dont la plus grande partie disparaît vers 150°C ;
- eau adsorbée, liée faiblement par attraction ionique ou forces de Van der Waals, éliminée en dessous de 300°C;
- eau de cristallisation (et eau zéolithique, piégée dans les cavités du réseau cristallin) faisant partie du réseau cristallin (entre autre, composante des hydrates). Elle est éliminée en dessous de 500°C.
- eau de formation, constituée des groupes hydroxyles des argiles, éliminée entre 400 °C et 800°C

Les deux derniers types d'eau sont parfois regroupés sous le nom d'"eau de structure", caractérisée par une libération au delà de 300°C.

Si la craie est soumise à des températures élevées, elle peut en outre, subir le phénomène de *décarbonatation* ($\text{MCO}_3 \rightarrow \text{MO} + \text{CO}_2$). Cette décarbonatation s'opère entre 650°C et 830°C pour la calcite et vers 600°C pour la dolomite. Le phénomène de décarbonatation complique l'interprétation des essais de thermogravimétrie au delà de 600°C, c'est-à-dire en ce qui concerne l'eau de formation.

Pour vérifier combien une craie séchée à l'étuve contient d'eau des divers types, des essais de désorption thermique - spectrographie de masse ont été réalisés par Phillips PCo (Lord et al.,1998). Les résultats d'un tel essai sur une craie à faible teneur en argile (de la formation Tor du champ d'Ekofisk, composée de 97.1% de calcite, 1.2% de quartz et 0.4% d'argiles)) sont présentés sur un diagramme quantité d'eau désorbée / température (Figure 2-20).

L'échantillon testé contient 1990 µg d'eau par gramme de matière sèche (calcite), ce qui correspond à environ 0.2% de teneur en eau ou encore, en supposant une porosité de 40 %, un degré de saturation de quelques 0.6%, 65 % de cette eau étant de la catégorie "eau de structure" (>300°C).

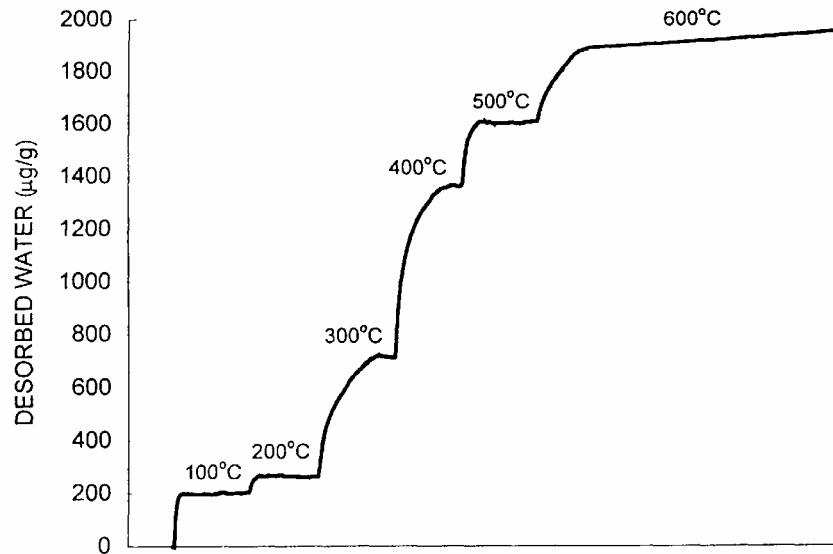


Figure 2-20 Désorption thermique (Lord et al, 1998)

La craie "sèche" contient donc encore une quantité non négligeable d'eau, dont le rôle sur le comportement mécanique peut être prépondérant.

2.5.2 Etats à saturation

In situ, dans les massifs crayeux continentaux (qui ne sont pas des réservoir pétroliers) compte tenu de la dimension des pores, la matrice crayeuse est pratiquement toujours saturée en eau, l'ascension capillaire dépassant 100 m d'après la loi de Jurin.

La tension superficielle eau/air vaut $72.75 \cdot 10^{-3}$ N/m. En considérant une mouillabilité parfaite, on peut, en première approximation, prendre $\theta = 0$.

Ave un rayon de pore de l'ordre de $0.1 \mu\text{m}$ à $0.5 \mu\text{m}$, la loi de Jurin donne une pression capillaire valant environ 0.3 MPa à 1.5 MPa, soit une ascension de 30 m à 150 m, ce qui est la plupart du temps suffisant pour que la matrice du massif soit saturée, même si le niveau de la nappe (dans les fissures) est plus bas.

Au laboratoire, pour "saturer" (totalement) en eau les échantillons destinés aux essais, plusieurs techniques existent. Les méthodes de saturation partielle et de contrôle de la succion sont assez spécifiques et seront évoquées plus loin.

Une expérience d'imbibition "spontanée" a été réalisée sur des échantillons de craie de Lixhe qui ont été séchés à l'étuve (105°C) jusqu'à poids constant, pesés puis immergés dans de l'eau en équilibre chimique avec la craie. Les échantillons étaient sortis du bain et pesés à intervalles de temps plus ou moins réguliers. Les échantillons testés avaient une porosité moyenne (déduite du poids sec et de la densité des grains de craie, 2.71) de 44%, ce qui correspond à une teneur en eau de 32.4% à 100% de degré de saturation.

Le diagramme (Figure 2-21) indique une augmentation linéaire de la teneur en eau en fonction du logarithme du temps, la saturation pratiquement totale étant atteinte après au moins un mois d'immersion.

Cette expérience confirme la nécessité de procéder à la saturation par des techniques plus sophistiquées qui seront exposées plus loin.

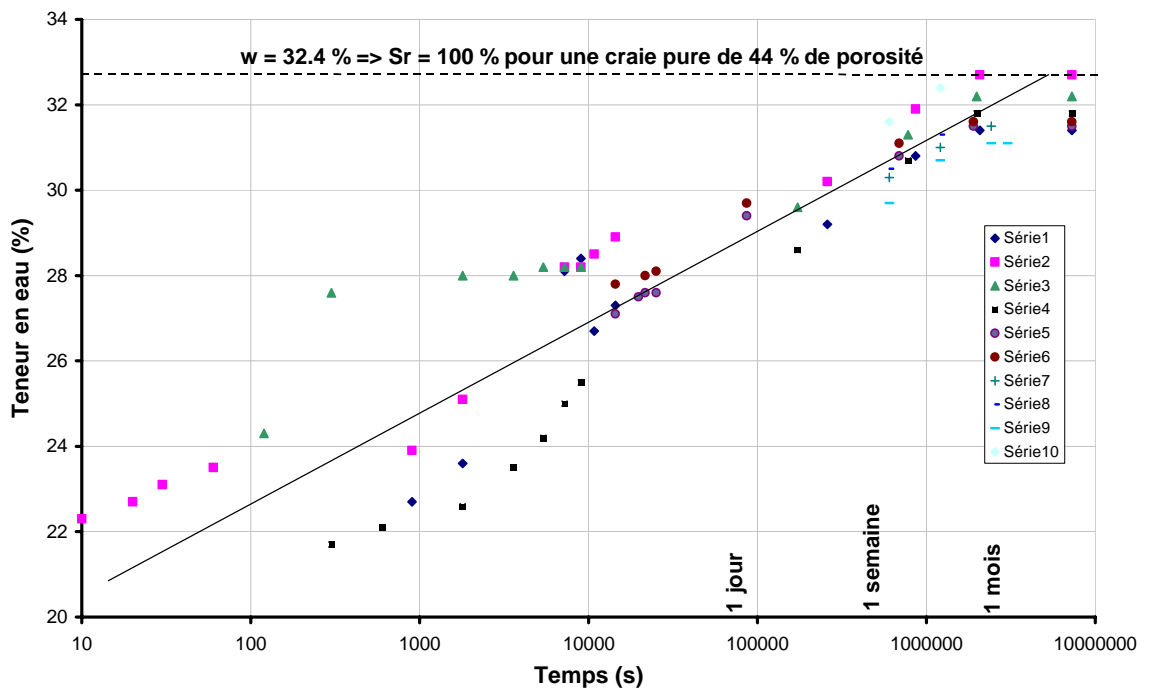


Figure 2-21 saturation de la craie par imbibition

D'un autre côté, il convient d'être extrêmement soigneux lors de la manipulation d'échantillons "secs", l'humidité ambiante faisant que l'échantillon capte assez vite une quantité non négligeable d'eau. Le diagramme ci-dessous (Figure 2-22) montre l'évolution du degré de saturation en eau d'un échantillon de craie de 43% de porosité, sorti de l'étuve après séchage à 105°C et placé à l'air (température 21°C, teneur en humidité de l'ordre de 60%). On constate que le degré de saturation augmente dès les premières minutes et se stabilise, dans les conditions de l'essai, vers 8.5% au bout d'1h 1/2 environ.

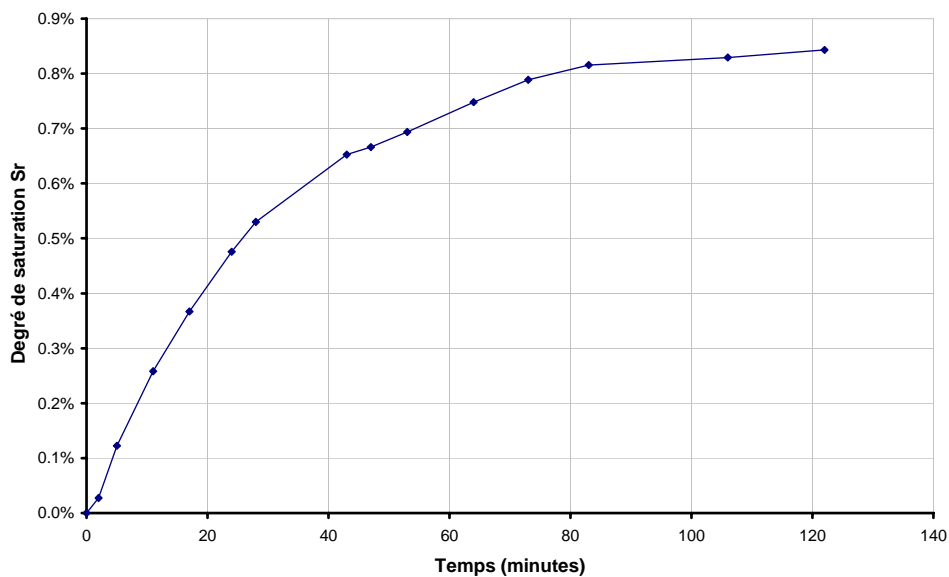


Figure 2-22 humidification de la craie par l'air ambiant

2.5.3 La craie non saturée

La craie peut ne pas être complètement saturée en fluide. Ceci peut arriver lorsqu'elle se trouve à trop grande hauteur au dessus de la nappe ou dans la zone d'évapotranspiration. Les pores sont alors partiellement remplis d'eau, le reste étant occupé par de l'air.

Une autre situation se présente dans les réservoirs pétroliers où le fluide interstitiel est composé de deux liquides non miscibles (eau et pétrole¹²). Dans ce cas il faut considérer la craie comme partiellement saturée par les différents fluides.

2.5.3.1 notion de succion

Considérons (Figure 2-23) un milieu poreux dont les pores sont remplis par deux fluides non miscibles (eau - air ou huile - eau). L'eau étant l'élément mouillant, va former des ménisques capillaires entre les grains de sol ou de calcite¹³. L'espace libre est occupé par le fluide non mouillant, air ou pétrole.

La succion peut être définie¹⁴ comme la différence entre la pression, u_a , de l'air ou de l'huile (qui est en fait la pression interstitielle classiquement mesurée en mécanique des sols et des roches) et la pression, u_w , existant dans l'eau du "ménisque capillaire" (pression négative puisque, par tension superficielle, l'eau exerce une *traction* sur les grains).

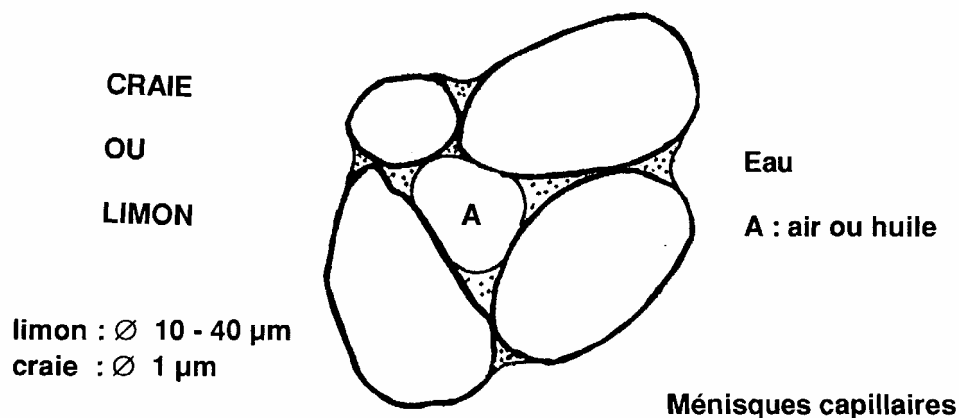


Figure 2-23 : représentation schématique d'un milieu granulaire non saturé

¹² la situation réelle est plus complexe, une phase gazeuse, dissoute ou non pouvant être présente. Par la suite, nous ne prendrons pas en compte cette phase et nous considérerons seulement les deux fluides non miscibles dont l'ensemble est supposé saturer totalement l'espace poreux.

¹³ dans le cas de sols argileux s'ajoutent des forces d'adsorption

¹⁴ il existe une définition plus complète et rigoureuse de la succion, incluant l'aspect thermodynamique; mais qui, dans la pratique, revient à la définition plus "intuitive" donnée ici (Delage & Cui, 2000)

La succion, s , est donc exprimée comme

$$s = u_a - u_w$$

Elle a les dimensions d'une contrainte et s'exprime donc en Pa.

Les agronomes, qui furent parmi les premiers à s'intéresser à la frange capillaire des sols, expriment la succion par le symbole pF qui représente le logarithme décimal de la succion, exprimée en centimètres de hauteur d'eau (1MPa = 10000 cm d'eau = $pF5$)

2.5.3.2 méthodes de contrôle de la succion

Si la *mesure* de la succion est délicate, il existe cependant plusieurs techniques de *contrôle* de succion, permettant d'imposer dans l'échantillon la valeur choisie de la succion. Le détail de ces techniques est renseigné dans la littérature (Fredlund & Rahardjo, 1993), (Delage & Cui, 2000). En résumé, les principales méthodes sont :

- **la méthode "de translation d'axe"**.

Elle consiste à placer l'échantillon dans une cellule "de Richards" (Figure 2-24)

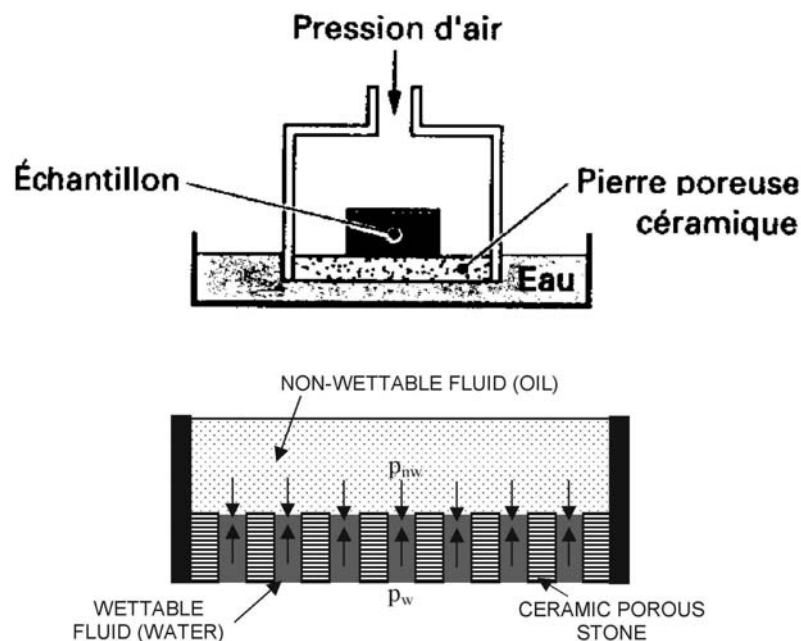


Figure 2-24 Cellule de Richards (d'après Delage & Cui, 2000)

Dans la cellule, l'échantillon, initialement saturé, repose sur une pierre poreuse, saturée en eau, et est soumis par le haut à une pression d'air. Les pores de la pierre poreuse sont calibrés (loi de Jurin) pour que la tension superficielle de l'eau empêche sa désaturation sous la pression d'air appliquée en haut mais n'empêche pas l'évacuation d'une certaine quantité d'eau hors de l'échantillon, sous l'effet de la pression d'air Au bout d'un certain temps (quelques jours à quelques semaines), l'équilibre est atteint. La succion obtenue est égale à la pression d'air $s = u_a - u_w$ (u_w étant nulle en raison de la continuité de la phase liquide).

- **la méthode osmotique**

Elle consiste à mettre en contact, au travers d'une membrane semi-perméable, d'un côté l'eau de l'échantillon et de l'autre côté, une solution aqueuse de molécules organiques (PEG - polyéthylène-glycol). L'échantillon, initialement saturé en eau est ainsi soumis à une pression osmotique, l'eau traversant la membrane semi-perméable, en direction du PEG. L'échantillon est ainsi progressivement désaturé jusqu'à la valeur de la succion imposée par la concentration de la solution aqueuse du PEG suivant la relation

$$s = 11 c^2$$

valable pour $s < 6.25$ MPa, où s est la succion (en MPa) et c la concentration de la solution de PEG (en g/g d'eau).

L'avantage de cette méthode est d'imposer directement la succion elle même plutôt que de passer par une pression d'air comme dans la méthode précédente.

- **contrôle par phase vapeur**

La loi de Kelvin donne la relation entre l'humidité ambiante et la succion correspondante (indépendante de la nature du milieu granulaire).

$$s = u_a - u_w = \frac{RT}{gM} \ln h$$

avec h : humidité relative, M : masse molaire de l'eau (18.016 g/mol), g : 9.81 m/s², R : constante des gaz (8.3143 J/mol.K), T : température (K)

L'humidité voulue est réalisée dans une enceinte fermée contenant une saumure dont la nature contrôle l'humidité relative. Le ci-dessous (Tableau 2-1) donne quelques exemples d'humidités et succions possibles pour différents sels (Delage & Cui, 2000).

Tableau 2-1 Relation nature de la saumure - humidité relative - succion

Sel	Succion (MPa)	Humidité relative (%)
K ₂ SO ₄	4.2	97
ZnSO ₄ .7H ₂ O	12.6	91.3
(NH ₄) ₂ SO ₄	29	81
NaCl	37.8	76
NaNO ₂	57.3	66
Mg(NO ₃) ₂	82.4	55
K ₂ CO ₃	137.8	44
KCH ₃ CO ₂	182.1	20
KOH	331.9	9

Il faut noter que l'indépendance de la nature du milieu granulaire concerne uniquement la relation entre la succion et l'humidité relative (de l'air baignant l'échantillon) et non de la teneur en eau atteinte par celui-ci à la stabilisation.

Cette méthode permet d'atteindre des succions élevées mais présente l'inconvénient de nécessiter de longues durées pour atteindre l'équilibre.

2.5.3.3 courbes de rétention

Les courbes de rétention indiquent la capacité d'un milieu granulaire non saturé à attirer et retenir l'eau.

Elles sont établies en portant l'échantillon à des niveaux croissants de succion (par une des méthodes citées précédemment) et en déterminant la teneur en eau correspondante (ou le degré de saturation)

Après la phase de séchage (succion croissante) l'échantillon est soumis à une phase de mouillage (humidification), c'est-à-dire à des succions décroissantes.

Le cycle dessiccation - humidification permet de construire le diagramme teneur en eau / logarithme de la succion, c'est-à-dire la courbe de rétention.

Des exemples de courbes de rétention pour des craies françaises et anglaises (Masson, 1973) sont données ci-après (Figure 2-25).

On remarque le phénomène d'hystérésis, la courbe de dessiccation étant au dessus de la courbe de mouillage. Ceci peut s'expliquer (Delage & Cui, 2000) par les interconnexions de pores de tailles variables, reliés en série ou en parallèle.

Ce phénomène d'hystérésis est similaire à celui observé dans le cas des porosimétries au mercure haute pression qui sont, à leur manière, des déterminations de courbes de rétention.

Les pétroliers utilisent d'ailleurs parfois¹⁵ la porosimétrie au mercure pour établir les courbes de "pression capillaire" dans les roches. L'exemple ci-dessous (Figure 2-26) concerne un essai réalisé sur une craie de Mer du Nord (Ander- sen, 1995).

Il faut noter que dans le cas de l'injection de mercure, la phase mouillante est la vapeur de mercure et que le mercure lui-même joue le rôle de l'air (ou de l'huile) dans le cas des sols et craies. Il est donc normal que les axes des abscisses s'inversent et que la plus grande "pression capillaire" corresponde au degré de saturation en mercure le plus élevé.

¹⁵ cette méthode est en fait rarement utilisée, les pétroliers préférant la méthode de translation d'axes, qu'ils appellent la méthode de "pierre poreuse" ou l'utilisation de centrifugeuses pour désaturer les échantillons. Des études (Greder et al., 1997), montrent que des corrélations fiables entre les courbes de pressions capillaires obtenues par injection de mercure et celles obtenues par les autres méthodes sont encore à établir.

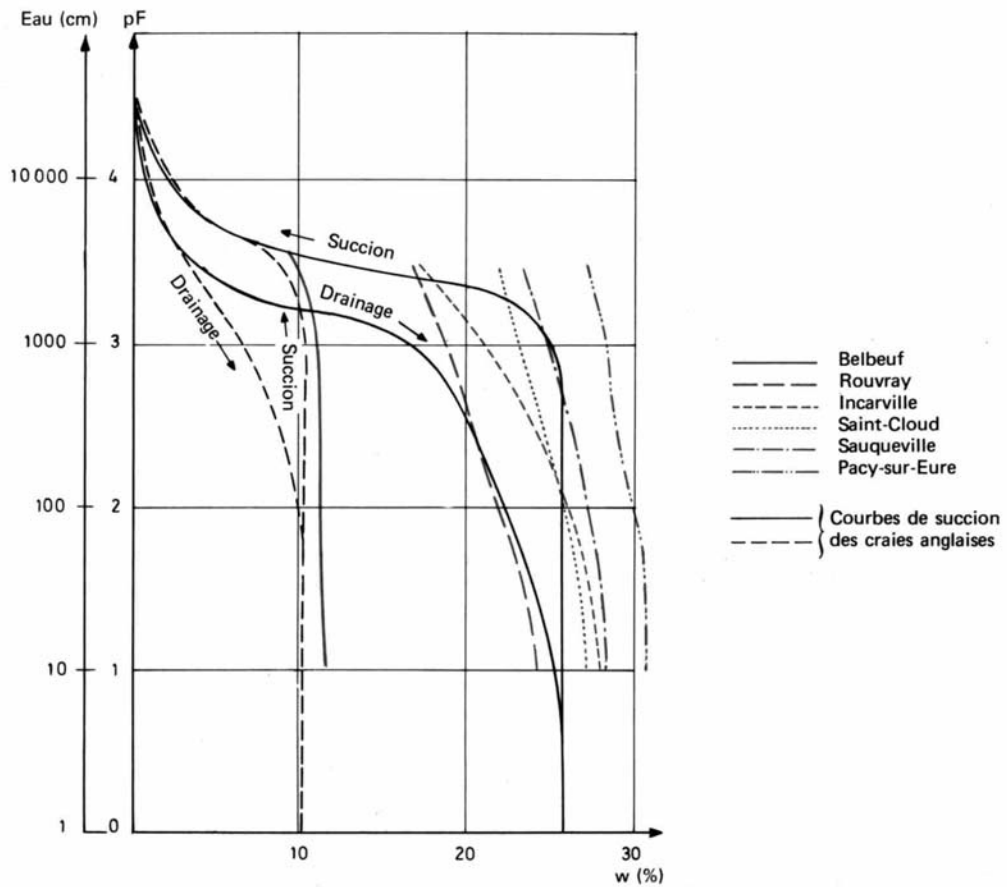


Figure 2-25 : courbes de rétention de craies françaises et anglaises (d'après Masson, 1973)

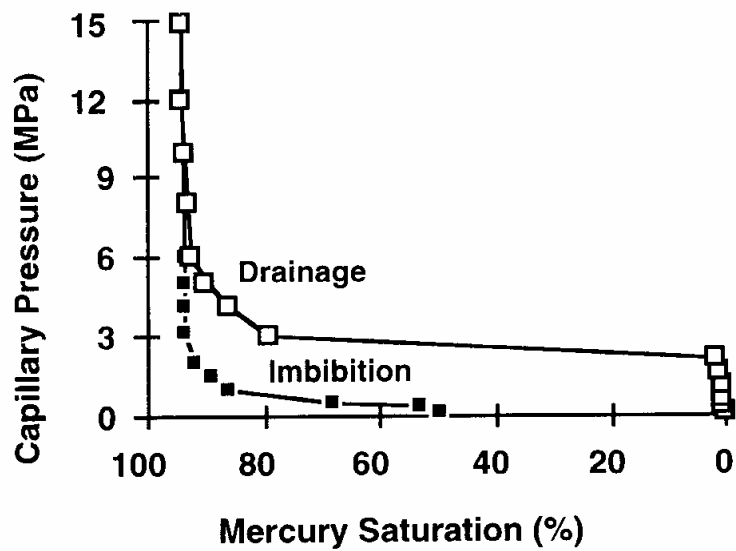


Figure 2-26 - Courbes d'injection de mercure dans une craie de Mer du Nord (d'après Andersen, 1995)

2.5.4 Mouillabilité

2.5.4.1 terminologie

La mouillabilité est un des facteurs principaux pour le reservoir engineering et pour ce qui concerne les interactions fluide - squelette intervenant dans le comportement mécanique de la craie.

L'étude de la mouillabilité fait appel à des notions de degrés de saturations¹⁶ ultimes des différents fluides saturant la roche.

Les dénominations de ces états ultimes sont les suivantes

Saturation irréductible à l'eau - Irreducible Water Saturation - S_{wir}

C'est le degré de saturation minimum qui peut être obtenu et celui auquel la perméabilité relative¹⁷ à l'eau approche de zéro.

Saturation en eau connée - Connate Water Saturation - S_{wi}

Il s'agit du degré de saturation en eau qui existait dans le gisement au moment de sa découverte. L'eau connée est l'eau "géologiquement" incluse dans la roche.

Les deux termes, bien que différents, sont cependant parfois confondus

Saturation résiduelle en huile - Residual Oil Saturation (to water) - S_{or}

C'est le degré de saturation en huile final, obtenu à la fin d'un essai, de laboratoire, de balayage à l'eau. Il se réfère le plus souvent au degré de saturation en huile auquel la perméabilité relative finale à l'huile, k_{ro} est nulle mais peut aussi désigner simplement la quantité d'huile résiduelle.

Les appellations suivantes, de même que d'autres termes non mentionnés ici (Dake, 1978) sont moins utilisées : "Saturation en huile subsistante - Remaining Oil Saturation" considérée dans le réservoir à l'échelle microscopique et de "Vraie saturation résiduelle en huile - True Residual Oil Saturation", valeur minimum minimorum qu'il est possible d'obtenir en combinant les méthodes.

Au cours des essais de balayage (ou lessivage, en anglais "flooding"), on parle de'

imbibition lorsque la teneur en eau **croît**

et de

drainage lorsque la teneur en eau **décroît**

¹⁶ conformément aux règles de mécanique des sols et des roches, la "teneur en fluide" est définie comme le rapport entre la masse du fluide et la masse du constituant sec. Le degré de saturation est la proportion entre la quantité du fluide que renferme le matériau par rapport à la quantité maximum qu'il pourrait contenir si tous les pores étaient complètement saturés.

¹⁷ les perméabilités relatives sont définies au § suivant

2.5.4.2 généralités

La mouillabilité peut être définie (Andersen, 1995) comme la *préférence* qu'a un matériau d'être en contact avec un fluide, plutôt qu'avec un autre. On peut aussi dire que c'est la tendance qu'a un fluide de mouiller une roche en présence d'un autre fluide, non miscible (par "fluide" il faut entendre liquide ou gaz).

Pour les pétroliers, cette propriété est capitale et recouvre des concepts tels que la pression capillaire, la perméabilité relative, la saturation irréductible, etc.

Ils distinguent principalement deux types de mouillabilité des roches :

- les roches mouillables à l'eau ("water-wet")
- les roches mouillables à l'huile ("oil-wet")

Pour caractériser la mouillabilité, on mesure l'angle de contact entre le fluide et la roche. Le schéma de la une goutte d'eau, entourée d'huile, posée sur une surface rocheuse (Figure 2-27), montre la différence entre une surface mouillable à l'huile ou à l'eau.

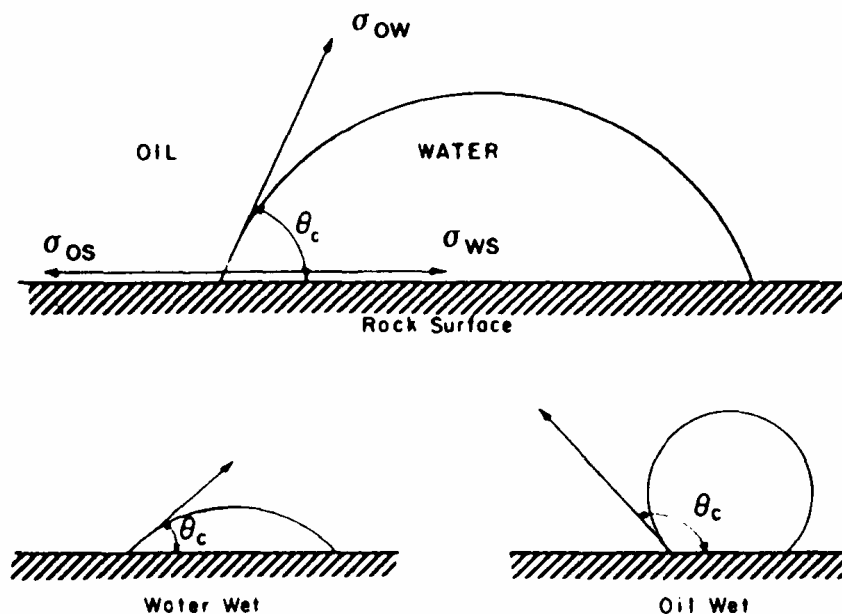


Figure 2-27 : Mouillabilité du système eau - huile - roche

L'angle θ_c vaut entre 0° et 75° pour une roche mouillable à l'eau, entre 60° et 120° pour une roche neutre et entre 105° et 180° pour une roche mouillable à l'huile.

La plupart des réservoirs sont mouillables à l'huile et il y a en fait peu de réservoirs mouillables à l'eau. Sans doute, faut-il voir là l'influence du film d'hydrocarbures et de matières organiques qui tapisse les grains de roche en général et de craie en particulier (Baldwin, 1985).

En plus des deux types principaux, on peut avoir une mouillabilité intermédiaire ou une mouillabilité partielle (où certains grains sont mouillables à l'eau et d'autres à l'huile).

2.5.4.3 mesure de la mouillabilité

La mesure de la mouillabilité est réalisée en général soit par le test d'Amott, soit par le test USBM, soit par un test combinant les deux procédures. Le détail des modes opératoires est donné par la littérature (Anderson, 1986b) . Ils sont résumés ci-après.

Dans le test Amott, l'échantillon est balayé à l'huile en centrifugeuse¹⁸ jusqu'à la saturation en eau connée (faible teneur en eau) puis immergé dans un tube rempli d'eau de formation (de "brine"). On mesure alors la quantité d'eau spontanément imbibée, ΔS_{ws} (ou ΔS_{wimb}). L'échantillon est remis en centrifugeuse et balayé à l'eau jusqu'à la saturation résiduelle en huile. On mesure la quantité d'eau introduite par cette imbibition "forcée", ΔS_{wdrv} . Le changement total en saturation en eau ΔS_{wt} est l'addition des deux imbibitions ($\Delta S_{wt} = \Delta S_{ws} + \Delta S_{wdrv}$).

L'échantillon est immergé dans l'huile. On mesure alors la quantité d'huile spontanément imbibée, ΔS_{os} (ou ΔS_{oimb}). L'échantillon est remis en centrifugeuse et balayé à l'huile jusqu'à la saturation en eau connée.

On mesure alors la quantité d'huile introduite par cette imbibition "forcée", ΔS_{odrv} . Le changement total en saturation en huile ΔS_{ot} est l'addition des deux imbibitions ($\Delta S_{ot} = \Delta S_{os} + \Delta S_{odrv}$). En principe, ΔS_{ot} devrait être égal à ΔS_{wt} .

On définit alors :

- le rapport de "déplacement à l'eau" : $\delta_w = \Delta S_{ws} / \Delta S_{wt}$

- le rapport de "déplacement à l'huile" : $\delta_o = \Delta S_{os} / \Delta S_{wt}$

L'indice de mouillabilité Amott-Harvey est défini par :

$$WI = \delta_w - \delta_o$$

Un système "roche très mouillable à l'eau / fluide" devrait donc avoir un indice $WI = 1$ tandis qu'un système "roche très mouillable à l'huile / fluide" devrait donc avoir un indice $WI = -1$. L'échelle de mouillabilité en fonction de la valeur de WI est donnée ci-dessous (Tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Echelle de mouillabilité

Mouillabilité	WI
Mouillable à l'eau	+ 0.3 à + 1.0
Légèrement mouillable à l'eau	+ 0.1 à + 0.3
Neutre	- 0.1 à + 0.1
Légèrement mouillable à l'huile	- 0.3 à - 0.1
Mouillable à l'huile	-1.0 à - 0.3

¹⁸ pour accélérer le mouvement du fluide par augmentation de la force motrice (poids du fluide)

Dans le test USBM, on mesure les courbes de pression capillaires (courbes de rétention), en procédant d'abord à une imbibition (en déplaçant l'huile jusqu'à la saturation résiduelle en huile - injection forcée d'eau) puis par un drainage (en déplaçant l'huile jusqu'à la saturation initiale en eau - injection forcée d'huile).

L'indice de mouillabilité USBM, W , est défini à partir du rapport de la surface, A, sous la courbe d'imbibition forcée à l'huile, à la surface, B, sous la courbe d'imbibition forcée à l'eau (Figure 2-28). Il varie en général entre -1 et 1.

$$W = \ln (A/B)$$

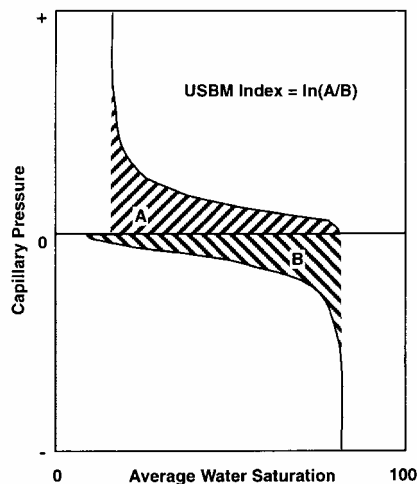


Figure 2-28 : Définition des surfaces pour le calcul de l'indice de mouillabilité USBM (d'après Andersen, 1995)

La méthode combinée Amott-USBM mesure à la fois l'imbibition spontanée et les courbes de pression capillaire (Figure 2-29).

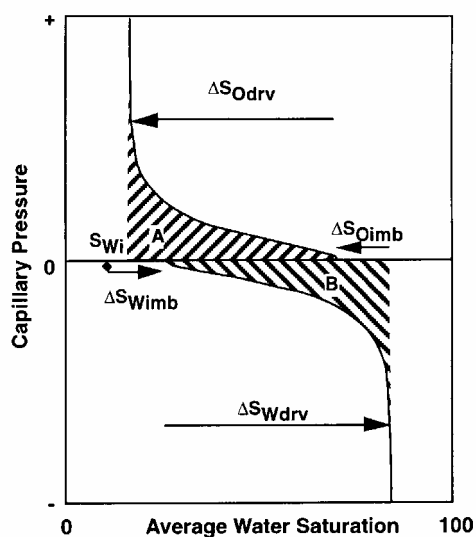


Figure 2-29 : Méthode combinée Amott-USBM - voir significations des symboles dans le texte (d'après Andersen, 1995)

2.5.4.4 modification de la mouillabilité

Le problème de la modification de la mouillabilité se pose surtout aux pétrophysiciens qui doivent analyser des échantillons prélevés dans des conditions qui ne préservent pas l'état *in situ* de l'échantillon dont la mouillabilité a pu être considérablement modifiée de ce fait.

En fait, si les facteurs contrôlant la mouillabilité des réservoirs font encore l'objet de discussions, l'action d'un grand nombre de substances sur la mouillabilité est bien connue. La mouillabilité est sensible à la chimie de l'eau de gisement (brine), au pH et à la nature des boues de forage. Il est bien connu qu'un carottage avec une boue à l'huile commerciale tend à rendre les échantillons plus mouillables à l'huile. De même, l'oxydation peut jouer un rôle et, évidemment, la pratique du nettoyage par extraction au Soxhlet qui a pour effet d'enlever les composants adsorbés et/ou les dépôts organiques. Dans ce cas, la mouillabilité de l'échantillon est déplacée vers la mouillabilité à l'eau.

D'autres facteurs existent et les pétrophysiciens compensent ces effets néfastes par une *restauration* (plus ou moins réussie) de la mouillabilité initiale. Cette restauration se fait par *ageing* (ou *aging*, terme anglais qui est plus souvent utilisé que "vieillesse" ou "maturation"). La technique consiste vider l'échantillon de tous les fluides (extraction et séchage), à le saturer par de l'eau de gisement (brine), à déplacer le brine par de l'huile de laboratoire, à porter l'échantillon à la température de gisement et à déplacer l'huile de laboratoire par de l'huile de gisement. L'échantillon est ensuite "mûri" (aged) à température élevée, durant 1000 heures ou davantage. Cette procédure ne garantit cependant pas que l'échantillon aura retrouvé sa mouillabilité "in situ".

Pour l'étude des propriétés mécaniques de la craie, le problème se pose dans ces mêmes termes si l'on travaille sur des échantillons de craies de réservoir bien que ces échantillons soient (trop) souvent testés après les procédures de nettoyage au toluène ou autre solvant, utilisées en pétrophysique. Les résultats des essais réalisés sur des échantillons après de tels traitements sont à considérer avec la plus grande prudence (Da Silva et al., 1990).

D'autre part, même s'ils sont bien traités, les échantillons de craies de réservoir n'en sont pas moins rares, difficile à obtenir.

Ils sont, de plus, hétérogènes car prélevés dans des forages différents ou, au sein d'un même forage, à des profondeurs variables. Il est ainsi souvent difficile d'obtenir deux ou trois échantillons "compagnons" et d'un échantillon à l'autre, les variations de porosité, de teneur en silice, de mouillabilité etc. sont importantes.

Pour ces raisons, la plupart des essais mécaniques sont réalisés sur des craies d'affleurement, devenues de véritables "standards". Parmi ces craies, on a, par ordre croissant de porosité, les origines suivantes : Vexin (n = 37%), Lixhe (n = 40-43%), Stevns Klint (n = 44-45%), Åalborg (n = 45-48%).

L'avantage est de disposer de quantités à peu près illimitées de craies les plus homogènes possible pour un matériau naturel, bien que, comme il a été vu plus haut, cette homogénéité ne soit pas absolue.

L'inconvénient est que les craies d'affleurement présentent une mouillabilité pratiquement constante, à l'eau, ce qui élimine la possibilité d'étudier l'influence de cet important paramètre.

Il est donc nécessaire de pouvoir modifier artificiellement la mouillabilité des craies d'affleurement. Pour cela, les craies sont soumises à des traitements analogues à ceux utilisés en pétrophysique pour la restauration de la mouillabilité d'origine ("ageing").

La méthode décrite ici est détaillée dans la littérature (Graue et al., 1998). Elle permet une modification contrôlable et reproductible de la mouillabilité, dans certaines limites toutefois.

Le mode opératoire est relativement simple : les échantillons, secs, sont saturés à 90°C avec de l'huile brute (crude oil) filtrée. La maturation se fait ensuite, toujours à 90°C durant des temps plus ou moins longs. Des essais de modifications de mouillabilité de craie de Åalborg, avec différentes procédures et différents temps de maturation (Graue et al., 1998) ont donné les résultats suivant (Figure 2-30).

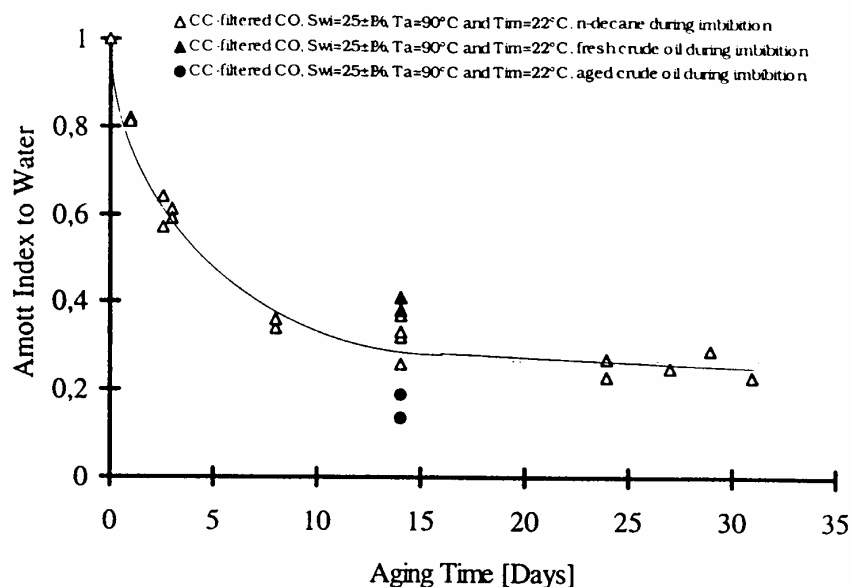


Figure 2-30 : Indice de mouillabilité Amott pour différents temps de maturation (d'après Graue et al., 1998)

On constate une diminution significative de la mouillabilité, chiffrée par l'indice Amott qui passe de 1 (parfaitement mouillable à l'eau) pour la craie d'affleurement à 0.2 (pratiquement neutre) après 15 jours à un mois de maturation. On n'atteint cependant pas la mouillabilité à l'huile des réservoirs.

Une méthode pour obtenir une mouillabilité à l'huile de craies d'affleurement a été décrite au Stavanger College (Standnes & Austad, 2000). Elle consiste à faire une saturation en huile brute, selon une procédure spécifique puis à attendre la maturation. La mouillabilité à l'huile ainsi provoquée dépend de l'acidité de l'huile brute utilisée : plus le "crude oil" a une acidité élevée, meilleure est sa capacité à donner de la craie mouillable à l'huile.

2.5.5 Perméabilité

Le déplacement des fluides dans la craie se fait à deux échelles :

- à celle de l'échantillon, sur lequel on mesure une perméabilité matricielle, principalement dans les pores, les microfissures étant peu nombreuses;
- à celle du massif (aquifère ou réservoir pétrolier) où la perméabilité de fissures est prépondérante.

Nous ne considérons ici que la perméabilité matricielle et le déplacement des fluides à l'échelle de l'échantillon.

2.5.5.1 rappel : notions de perméabilité - unités

La loi de Darcy exprime la relation entre la vitesse, v , d'un fluide (incompressible) coulant à travers un milieu et le gradient hydraulique, i , auquel il est soumis.

La vitesse, v , est le rapport entre le débit du fluide et la section totale qu'il traverse (il ne s'agit donc pas de la vitesse réelle du fluide):

$$v = \frac{Q}{S}$$

où

v : vitesse de Darcy, en m/s

Q : débit du fluide, en m³/s

S : section totale, en m²

Pour l'eau , la loi de Darcy s'écrit :

$$v = k \cdot i^{19}$$

où

k : coefficient de perméabilité²⁰ de Darcy, en m/s

i : gradient hydraulique (= charge hydraulique (en m) / longueur de l'élément traversé sous cette charge), adimensionnel

¹⁹ La loi de Darcy est souvent exprimée sans tenir compte du signe du gradient. Toutefois, lorsqu'elle est utilisée pour définir un mouvement linéaire et qu'elle est couplée à d'autres lois (transfert de chaleur par exemple) le gradient dans le sens du mouvement de l'eau doit être pris avec son signe et la loi s'écrit $v = -k \cdot i$

²⁰ Le terme "conductivité hydraulique" est de plus en plus employé à la place du terme "coefficient de perméabilité", dans l'acception de Darcy. Certains auteurs s'autorisant des libertés, il est toujours bon de vérifier la dimension des équations pour savoir exactement de quoi il est question.

Le coefficient de perméabilité de Darcy, dépend de la structure et de la nature du milieu perméable mais aussi des propriétés du fluide telles que la viscosité et le poids volumique.

Si le milieu est complètement saturé, la loi de Darcy, peut s'écrire d'une manière plus générale, en utilisant un coefficient de perméabilité ne dépendant plus du fluide mais uniquement du milieu traversé, la *perméabilité absolue*, K.

$$v = K \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot i$$

où

K : perméabilité absolue, en m^2 ²¹

ρ : masse volumique du fluide, en kg/m^3

g : accélération de la pesanteur en m/s^2

μ : viscosité dynamique, en Pa.s ²²

on a donc :

$$k = K \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu}$$

2.5.5.2 mesure de la perméabilité - cas du fluide unique - facteurs principaux

Dans le cas d'un matériau saturé par un fluide unique, les valeurs de la perméabilité sont relativement simples à déterminer. Elles sont en général mesurées directement par les méthodes classiques en mécanique des sols, au perméamètre (triaxial ou non), à charge variable ou constante, à l'oedomètre etc.. La qualité des mesures dépend d'un certain nombre de facteurs, en particulier, dans le cas de matériaux relativement peu perméables (ce qui est le cas de la craie à l'échelle de l'échantillon) les problèmes de contournement de l'échantillon (passage latéral) peuvent fausser considérablement les mesures.

La perméabilité dépend de la porosité mais aussi de la morphologie des grains. Elle est influencée par l'état de contrainte.

L'influence de la porosité et de la morphologie se voit sur les deux diagrammes ci-dessous (Figure 2-31 et Figure 2-32) (Monjoie, Schroeder et al., 1985a et Monjoie & Schroeder, 1996) qui montrent les relations entre la porosité et la perméabilité (à l'air) obtenues sur les échantillons de deux formations du gisement d'Ekofisk. Ces formations, appelées *Tor* et *Ekofisk*, sont assez différentes l'une de l'autre (voir chapitre 4.1 et annexes).

²¹ La perméabilité absolue s'exprime fréquemment en Darcy ou plutôt en mD (milliDarcy).

1 Darcy = $10^{-12} m^2$ ou encore 1Darcy = 1 micron²

Pour l'eau, K = 1mD équivaut environ à $k = 10^{-8} m/s$

²² La viscosité dynamique s'exprime couramment en Poise ou plutôt en cp (centipoise)

1 cp = 0.001 Pa.s

Pour la *formation Tor* (Figure 2-31), dont les grains sont principalement rhomboédriques, la corrélation porosité / perméabilité est satisfaisante.

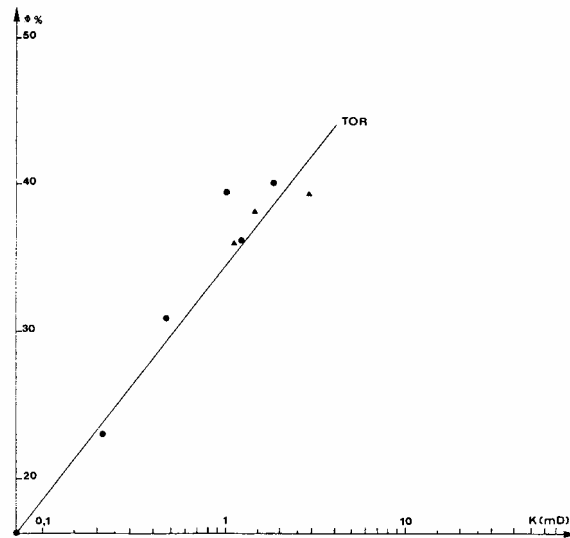


Figure 2-31 : relation porosité - perméabilité - formation Tor

Pour la *formation Ekofisk*, plus hétérogène au point de vue morphologie des grains, il est nécessaire de prendre en considération la forme des grains pour obtenir une bonne corrélation (Figure 2-32). On remarque deux droites de corrélation, l'une relative aux grains arrondis, l'autre relative aux grains rhomboédriques. Cette dernière droite est proche de celle obtenue pour la *formation Tor*. On note aussi qu'à porosité égale, les perméabilités des craies à grains rhomboédriques sont plus élevées que celles des craies à grains arrondis.

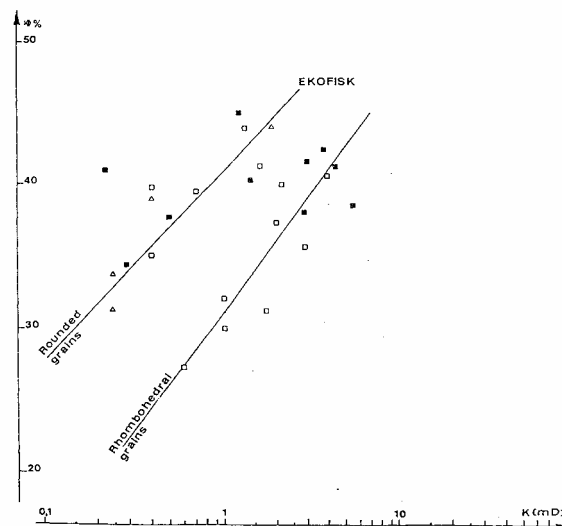


Figure 2-32: relation porosité - perméabilité - formation Ekofisk

Outre l'effet possible de la morphologie, l'influence de la dimension des grains se manifeste clairement: les grains arrondis étant plus petits que les grains rhomboédriques confèrent donc à l'échantillon une perméabilité plus faible.

L'influence de l'état de contraintes est traduit par le diagramme (Figure 2-33) qui donne l'évolution de la perméabilité à l'eau au cours d'un essai de compression isotrope (Monjoie & Schroeder, 1989). On note une diminution progressive de la perméabilité au fur et à mesure de la diminution du volume poreux due à l'augmentation de la contrainte moyenne, cette diminution étant plus rapide à partir de 7 MPa, c'est-à-dire à partir du moment où l'effondrement poreux (voir § 4.3) s'est produit.

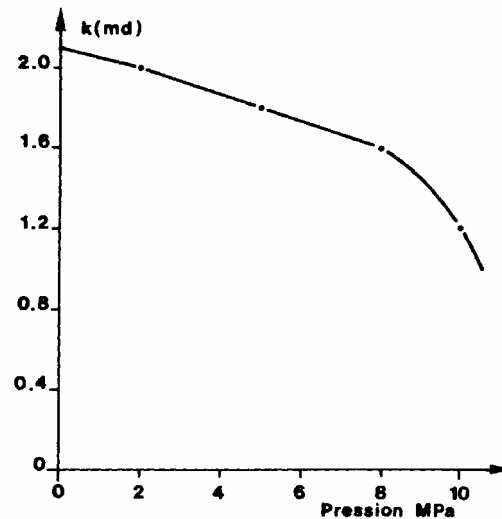


Figure 2-33 : influence de l'état de contrainte sur la perméabilité

2.5.5.3 mesure indirecte de la perméabilité - produit k.h

La mesure de l'ascension capillaire, du produit "kh", essai classique en mécanique des sols, est aussi parfois utilisée pour déterminer la perméabilité des craies. Cet essai (Costet & Sanglerat, 1969), consiste à plonger la base d'une éprouvette dans de l'eau et à mesurer en fonction du temps la hauteur d'eau montée par capillarité dans l'éprouvette. On exprime le débit de cette ascension par la loi de Darcy et par le volume transité dans une longueur élémentaire de l'éprouvette

$$q = S \cdot k \cdot \frac{h-1}{z} \quad \text{et} \quad q = S \cdot n \cdot \frac{dz}{dt}$$

avec

z : hauteur d'eau, en m mesurée au temps t (en s)

h : hauteur limite de l'ascension capillaire, en m

S : section de l'éprouvette, en m²

n : porosité efficace

Les variations du produit kh sont dues pour l'essentiel aux variations de porosité de la craie. Le diagramme porosité / kh (Figure 2-34) donne un exemple de résultats obtenus sur une craie campanienne (Coulon et al., 1999). Il faut noter que, sur ce diagramme, le produit kh est exprimé en cm²/heure.

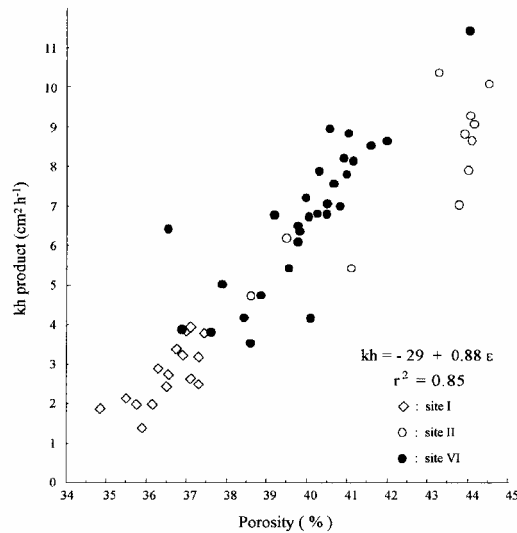


Figure 2-34 relation porosité - produit kh (d'après Coulon et al, 1999)

La corrélation entre "k" mesuré directement et "k" déduit de "kh" n'est pas évidente, la difficulté étant d'estimer correctement la valeur de "h" qui, comme il a été vu, dépend, entre autres, du diamètre des pores d'entrée. Un exemple de comparaison entre la perméabilité déduite d'essais kh et celle mesurée directement au perméamètre à charge constante (Coulon et al., 1999) est donné ci-après (Figure 2-35).

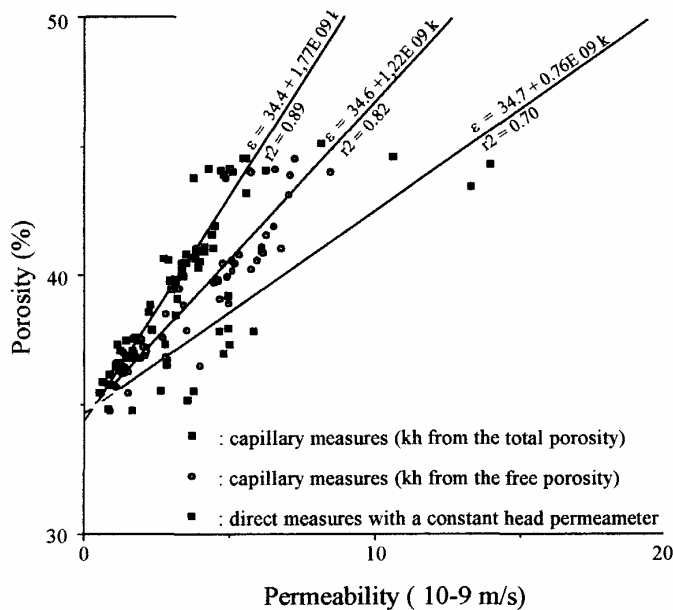


Figure 2-35: Comparaison entre perméabilités déduites de l'essai kh et mesurées au perméamètre à charge constante

A porosité égale, les mesures directes de k sont plus grandes que celles déduites de l'essai kh. Si on considère qu'une partie seulement de la porosité totale est utilisée pour l'ascension capillaire (appelée "free porosity" sur la figure), on peut réduire l'écart mais cette réduction dépendra des hypothèses faites sur la part de la porosité totale que représente la porosité efficace.

2.5.5.4 notion de perméabilités relatives

Lorsqu'il y a deux fluides non miscibles, chacun occupe une partie du volume poreux (si le milieu est complètement saturé, la somme des degrés de saturation partielles vaut l'unité)

Si les fluides se déplacent à travers le milieu, chacun se déplacera selon sa propre perméabilité relative, en fonction de la mouillabilité du squelette solide.

Le déplacement de deux fluides non miscibles (ici du pétrole déplacé par de l'eau) peut avoir diverses formes en fonction de la mouillabilité de la roche, ce qui a des conséquences sur la récupération du pétrole (Figure 2-36).

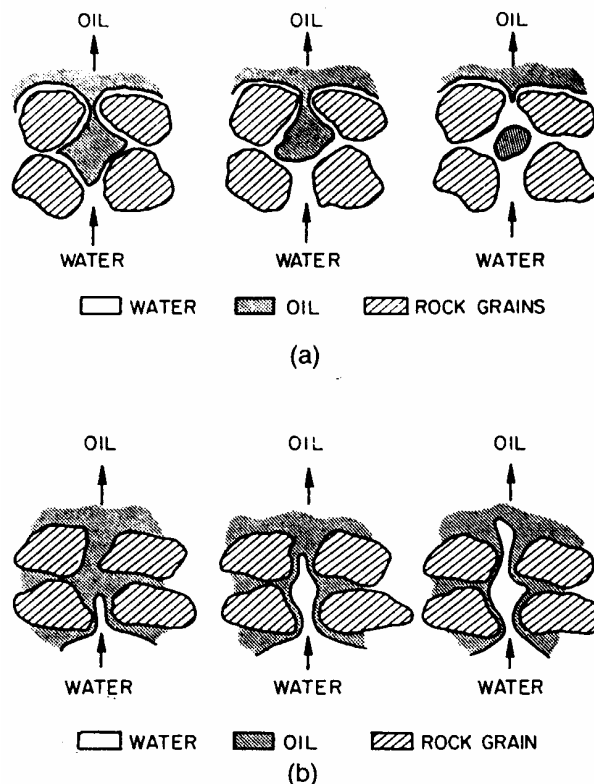


Figure 2-36 Déplacement d'huile par de l'eau au cours d'un "waterflooding".
 a) roche mouillable à l'eau b) roche mouillable à l'huile (d'après Anderson, 1987b)

Les perméabilités relatives des deux fluides, l'un mouillant, l'autre non mouillant, varient en fonction du degré de saturation des fluides, la somme des deux perméabilités relatives étant toujours inférieure à la perméabilité absolue (dans le cas d'un fluide unique).

Les évolutions typiques des perméabilités relatives des deux fluides, mouillant et non mouillant en fonction du degré de saturation en eau sont données au diagramme ci-dessous (Figure 2-37).

Les courbes sont limitées aux degrés de saturation extrêmes décrits au paragraphe 2.5.4.1 entre les bornes que sont la "Saturation irréductible à l'eau - S_{wir} " et la "Saturation résiduelle en huile - S_{or} ".

Sur la figure, elles sont extrapolées en pointillé jusqu'à la valeur de la perméabilité absolue.

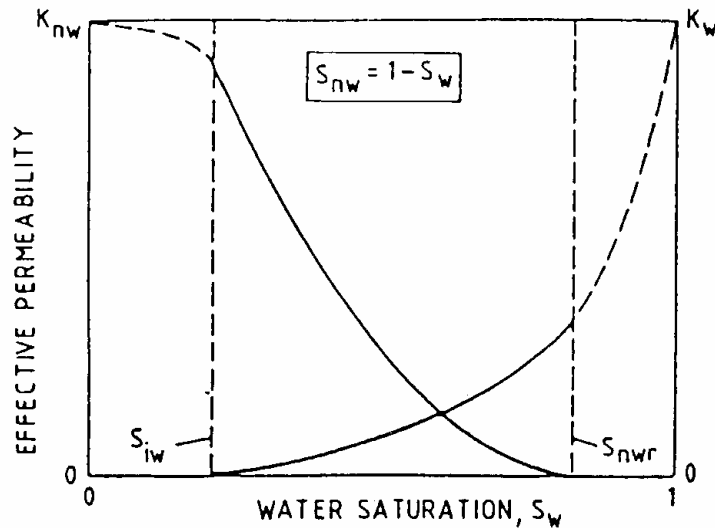


Figure 2-37 Perméabilités effectives du fluide mouillant et non mouillant (d'après Van Impe et al., 1999)

La forme des courbes dépend de la mouillabilité de la roche ainsi que le montrent les deux diagrammes (Figure 2-38) qui sont relatifs respectivement à une roche fortement mouillable à l'eau et à une roche fortement mouillable à l'huile.

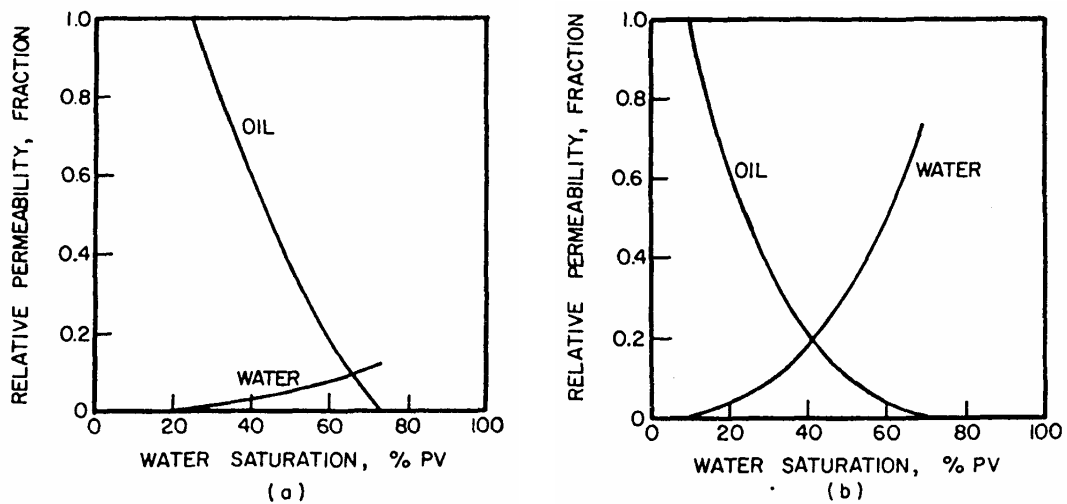


Figure 2-38 Courbes typiques de perméabilités relatives (Anderson, 1978b)
 a) roche mouillable à l'eau b) roche mouillable à l'huile

Comme on peut s'y attendre, la perméabilité relative à l'eau est plus faible dans le cas d'une matrice mouillable à l'eau que dans le cas d'une matrice mouillable à l'huile.

2.5.6 Imbibition - déplacement

L'importance de la mouillabilité sur le déplacement de l'eau et des hydrocarbures dans la craie a été montrée plus haut (Figure 2-36).

En vue de la récupération secondaire du pétrole, des études plus détaillées du lessivage d'un fluide par un autre ont été réalisées aux LGIH et fait l'objet de publications (Monjoie, Schroeder et al., 1985a et Monjoie & Schroeder, 1996). Ces deux publications figurent en annexe.

Ces essais, conduits sur des échantillons de craies d'affleurement et sur craies des *formations Tor et Ekofisk* (voir § 3.2) comprennent d'abord une saturation de la craie par un fluide (huile ou eau selon l'essai) puis une injection de fluide de lessivage sous une faible pression différentielle (0.1 à 0.2 MPa).

La progression du fluide injecté est suivie par traceurs chimiques (Cu EDTA) ou radioactifs (huiles marquées au Carbone 14). Après l'essai, l'éprouvette est coupée en fines tranches, transversales ou concentriques, les tranches étant analysées, soit chimiquement, soit au scintillomètre afin de déterminer le pourcentage de fluide lessivant.

Le but des essais étant d'étudier les effets des injections d'eau dans les craies, les essais ont été réalisés en injectant une solution aqueuse de Cu EDTA dans des craies saturées soit à l'eau, soit à l'huile, en l'occurrence, du dodécane, de l'hexadécane ou de l'huile brute de gisement.

Le détail des études se trouve dans les publications annexées. Les principaux résultats sont résumés par le schéma ci-dessous (Figure 2-39).

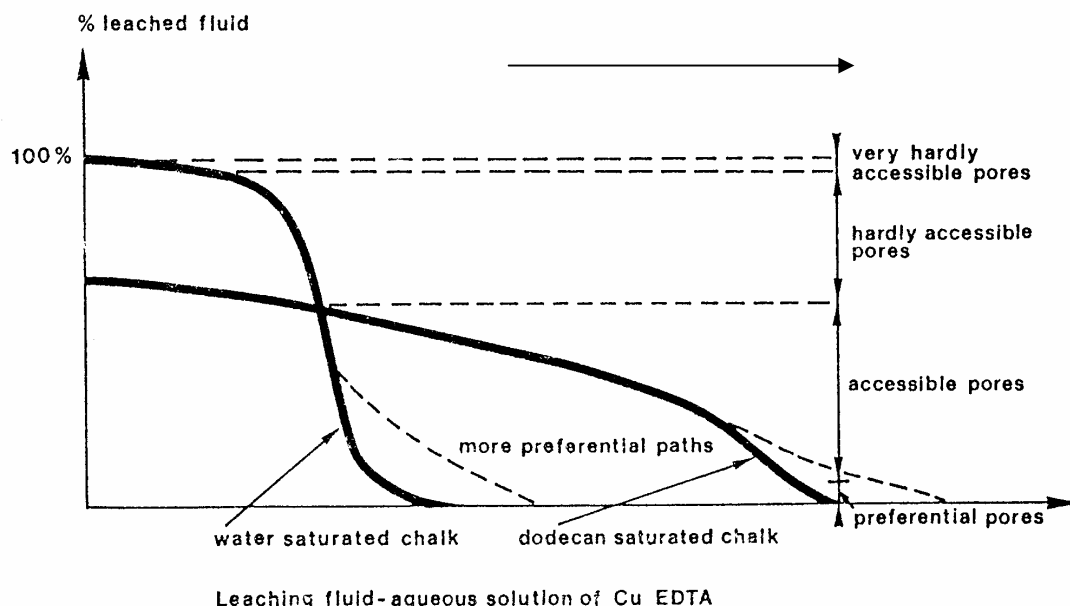


Figure 2-39: résultats des essais de balayages par de l'eau marquée au Cu EDTA, de craies saturées en huile ou en eau - la flèche indique le sens d'injection (Monjoie, Schroeder et al., 1985a)

La forme du front de propagation dépend clairement de la miscibilité des fluides : lorsqu'on réalise le balayage (à l'eau) d'un fluide aqueux, le front a davantage une forme régulière ("effet piston") que lorsqu'on balaye une craie saturée en hydrocarbures.

Dans ce dernier cas, le front de propagation n'est marqué qu'en son extrémité. Pour le reste de l'éprouvette, jusqu'à la face d'injection, la concentration varie presque linéairement, la concentration maximum obtenue étant inférieure à celle obtenue dans le cas du lessivage par un fluide de même type que le fluide saturant.

De ces courbes d'imbibition, on définit quatre types de pores :

- pores *non accessibles*, représentant seulement un faible pourcentage du volume poreux total et qui ne sont jamais lessivés.
- pores *difficilement accessibles*, non lessivés par un fluide différent du fluide saturant
- pores *aisément accessibles* dont le lessivage caractérise la forme du front de propagation.
- *chemins préférentiels* qui font partie des pores aisément accessibles mais qui avancent le lessivage au delà du front de propagation

La perméabilité (et donc la porosité) et la morphologie des grains conditionnent la forme du front de propagation. Les détails sont données dans l'article en annexe (Monjoie, Schroeder et al., 1985a).

En résumé :

- pour les fortes perméabilités (5 mD), le front est relativement homogène;
- aux perméabilités intermédiaires (1.5 - 1.7 mD), une teneur élevée en hydrocarbures résiduels (2.7%) favorise les chemins préférentiels par rapport à l'échantillon contenant peu (0.9 %) d'hydrocarbures résiduels;
- aux faibles perméabilités (0.8 - 0.9 mD), les chemins préférentiels sont plus nombreux pour l'échantillon de la formation Ekofisk, à grains arrondis que pour celui de la formation Tor, en dépit du plus grand pourcentage d'hydrocarbures résiduels de ce dernier.

Une augmentation des chemins préférentiels est donc observée lorsque les hydrocarbures résiduels augmentent ou lorsque les grains sont arrondis.

2.6 Caractéristiques géophysiques

Bien qu'au point de vue mécanique, les propriétés sismiques soient les plus importantes, les caractéristiques électriques méritent aussi d'être, au moins brièvement, renseignées, lors de leur utilisation en prospection dans les forages (diagraphies).

2.6.1 Propriétés électriques

La conductivité électrique de la craie dépend exclusivement de la conductivité de son fluide interstitiel et de la présence de minéraux conducteurs, comme les argiles, la matrice carbonatée étant très résistive.

C'est ainsi que saturée en eau en équilibre chimique avec elle, la craie aura une résistivité de l'ordre de 200 Ohm.m, la résistivité pouvant descendre à moins de 10 Ohm.m en cas de saturation par de l'eau de mer ou lorsque la teneur en argile devient importante, comme dans le cas de la marne.

Des diagraphies récentes de deux forages profonds dans le bassin de Paris (Renoux & Di Giandomenico, 2000) donnent, pour des puits forés à l'eau douce (moins conductrice que l'eau de gisement), des résistivités moyennes de l'ordre de 7 à 120 Ohm.m (intervalle de variation : 20 à 200 Ohm.m).

2.6.2 Propriétés sismiques

La mesure des vitesses de propagation (des "célérités") des ondes sismiques longitudinales et transversales est utilisée au laboratoire, pour la détermination des caractéristiques de microfissuration et pour la caractérisation physique de la plupart des échantillons testés.

Elle s'emploie aussi *in situ*, pour déterminer, entre autres, la porosité et la fissuration des massifs rocheux.

2.6.2.1 en laboratoire

Les mesures des vitesses de propagation des ondes sismiques longitudinales (appelées dans la suite "vitesses soniques") permet de caractériser quantitativement l'état de microfissuration des échantillons à tester.

Ceci se fait en utilisant la notion d'*Indice de Continuité*, IC (Fourmaintraux & Tourenq, 1970, Tourenq et al., 1971).

L'indice de continuité est défini à partir des travaux de Hill (Hill, 1952) qui a établi que les propriétés élastiques d'une roche mono- ou polycristalline sont conditionnées par les propriétés élastiques des cristaux qui la composent.

En pratique, on peut estimer qu'une propriété élastique quelconque, P, d'une roche (par exemple, vitesse de propagation des ondes sismiques ou module d'élasticité) est bien approchée par la moyenne arithmétique pondérée des propriétés élastiques de ses composants :

$$P = \sum_i P_i \cdot c_i$$

où P_i est la propriété élastique du $i^{\text{ème}}$ composant et c_i est la proportion de ce composant dans la roche.

Dans la formule ci-dessus, les propriétés des cristaux sont supposées isotropes, ce qui est souvent loin d'être le cas (par exemple, la vitesse de propagation des ondes sismiques dans la calcite varie suivant la direction de 5300 m/s à 7000 m/s). En fait, on ne considère ici que les roches isotropes (ou faiblement anisotropes) dans lesquelles la répartition des orientations des cristaux peut être supposée aléatoire et on peut donc utiliser une valeur moyenne unique, isotrope, de la propriété élastique, dans le cas de la calcite, 6660 m/s (Alexandrov et al., 1966).

A partir de la connaissance de la composition minéralogique d'une roche, il est donc possible de calculer quelle devrait être la valeur d'une de ses propriétés élastiques. L'écart entre cette valeur théorique *calculée* et la valeur réelle *mesurée* sur l'échantillon caractérise le degré de discontinuité du milieu. L'indice de continuité est défini sur base des vitesses soniques, V_l :

$$IC = \frac{V_{l\text{mesurée}}}{V_{l\text{calculée}}} \cdot 100$$

Il permet de déterminer aisément la part qui revient aux pores et à la fissuration dans la porosité totale de l'échantillon. On a en effet :

$$IC = 100 - a \cdot n_p - b \cdot n_f$$

avec n : porosité totale, n_f : porosité de fissures et n_p : porosité de pores

Ce qui est illustré par le diagramme IC / porosité bien connu (Figure 2-40).

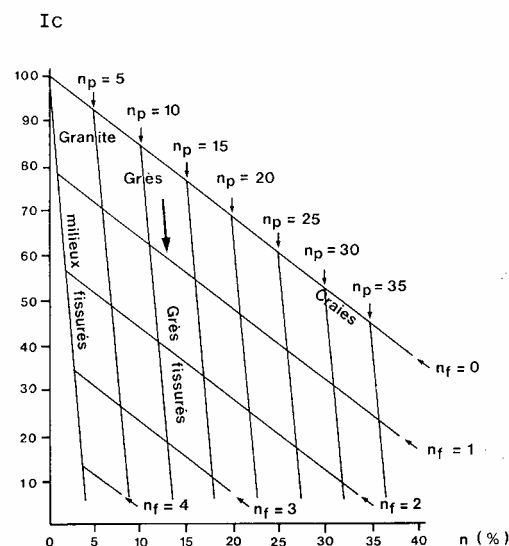


Figure 2-40: Indice de continuité - influence des différentes porosités

Pour l'ensemble des roches, on admet habituellement : $a = 1.6$, $b = 22$

Pour la craie, des mesures réalisées aux LGIH conduisent plutôt à adopter $a = 1.5$ et $b = 22$.

Les mesures de vitesses soniques sur échantillons de craies campanienne donnent 2260 à 2440 m/s pour la craie sèche, 2530 m/s pour la craie saturée à l'eau et 2350 m/s pour la craie saturée à l'huile.

Avec une vitesse sonique de 2400 m/s la craie testée, composée uniquement de calcite ($V_l = 660$ m/s) a un $IC = 36$, ce qui pour 43% de porosité donne une porosité de fissure pratiquement nulle (ce qui est effectivement observé sur les échantillons).

D'autre part, l'évolution des vitesses soniques en fonction de la saturation en fluide est donnée ci-dessous (Figure 2-41). Cette figure montre l'influence du fluide qui intervient par deux mécanismes antagonistes.

D'une part la masse volumique totale augmente avec le degré de saturation ce qui provoque une augmentation des vitesses soniques (Gassman, 1976).

D'autre part, l'augmentation de teneur en eau provoque une diminution de la succion qui entraîne une réduction de la contrainte intergranulaire et, partant, une diminution de la vitesse sonique. Cet effet est bien marqué pour les craies à l'eau mais, bien entendu, ne l'est pas pour les craies à l'huile, fluide non mouillant. La diminution de vitesse sonique entre 10% et 60 % de degré de saturation est difficile à expliquer et ne correspond pas aux données de la littérature pour d'autres roches que les craies (Gregory, 1976).

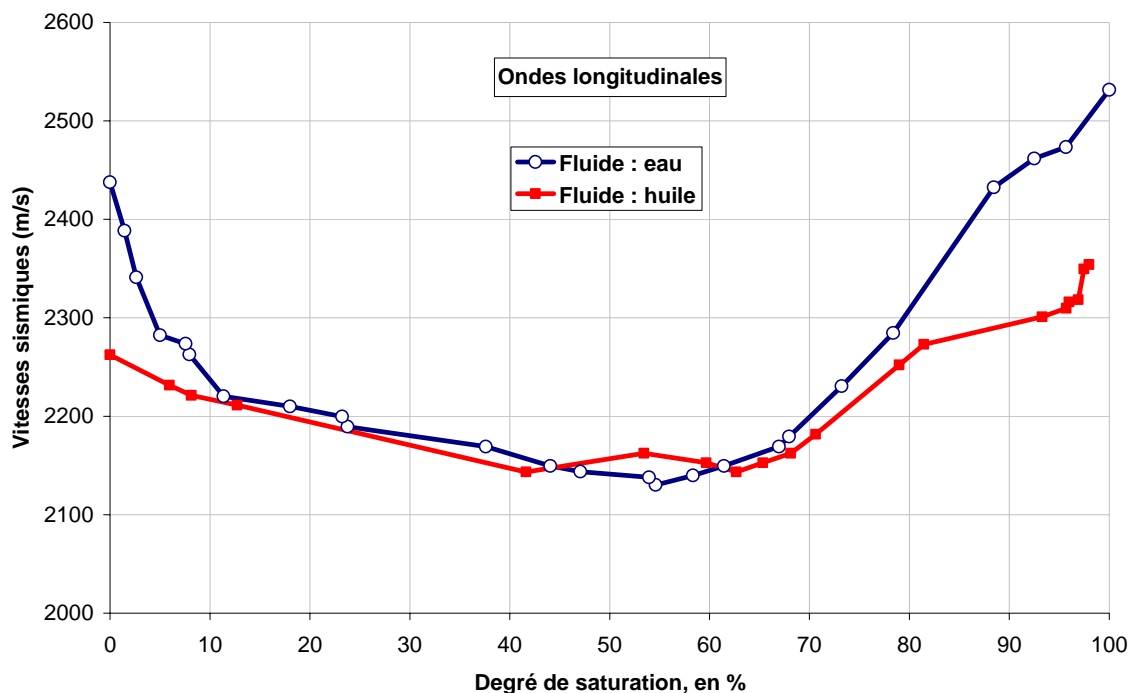


Figure 2-41 : Evolution des vitesses de propagation des ondes sismiques de compression (vitesses soniques) en fonction de l'état de saturation de craies campaniennes.

Les mesures de la vitesse de propagation des ondes transversales donnent un diagramme légèrement différent (Figure 2-42). Comme les ondes de cisaillement ne sont pas transmises par les fluides, il n'y a pas d'augmentation de la vitesse avec le degré de saturation. Seul se marque l'effet de la succion pour

les très faibles valeurs du degré de saturation en eau. La diminution de vitesse avec l'augmentation du degré de saturation doit encore être expliquée.

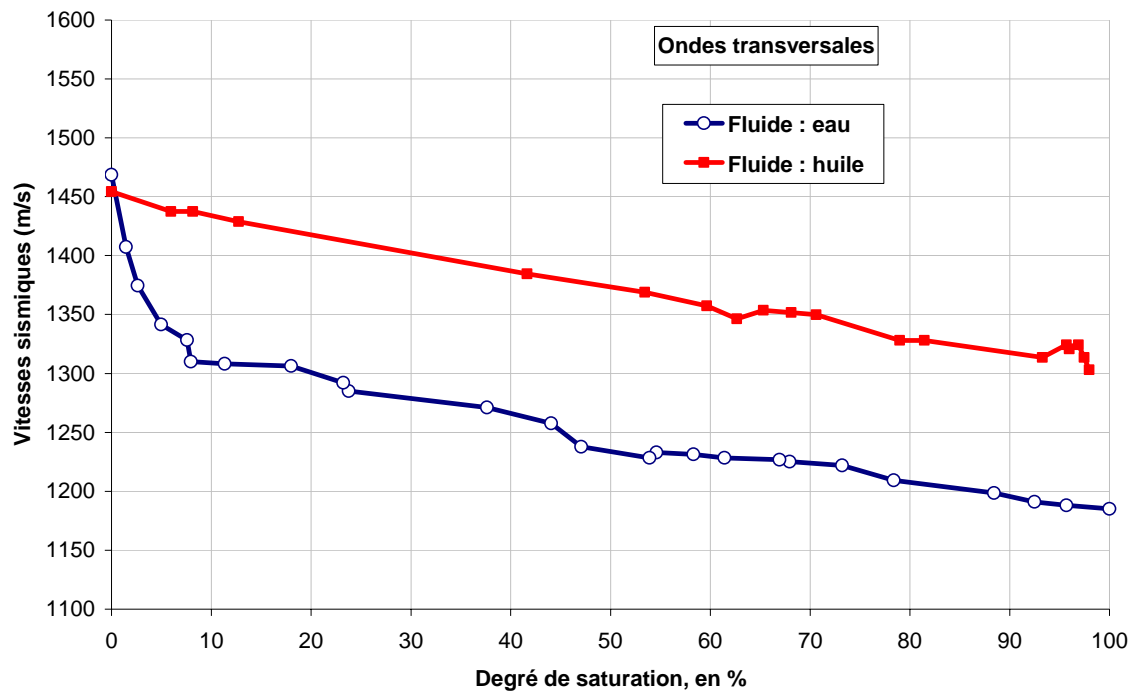


Figure 2-42: Evolution des vitesses de propagation des ondes sismiques de cisaillement (ondes transversales) en fonction de l'état de saturation de craies campaniennes.

2.6.2.2 in situ

La mesure des vitesses de propagation des ondes sismiques in situ permet de caractériser la compacité et le taux de fissuration du massif.

La publication en annexe (Schroeder et al., 1996) montre qu'il est possible d'étendre à l'échelle du massif rocheux la notion d'indice de continuité. Cette publication donne un exemple de détermination du degré de fissuration d'un massif de craie par différentes méthodes.

Un exemple de mesure de caractéristiques sismiques des massifs crayeux est donné par les forages récemment réalisés dans le Bassin de Paris. Des mesures diagraphiques (Renoux & Di Giandomenico, 2000, Bergues & Charpentier, 2000) dans deux forages ont donné l'évolution de la vitesse sismique en fonction de la profondeur, entre 30 et 700 m ainsi que l'évolution de la porosité (Figure 2-43).

Les vitesses soniques suivent une loi remarquablement linéaire en fonction de la profondeur. Les différences observées entre les deux puits s'expliquent en partie par les différences de porosité. De plus, l'évolution des vitesses soniques en profondeur va de pair avec l'évolution des porosités.

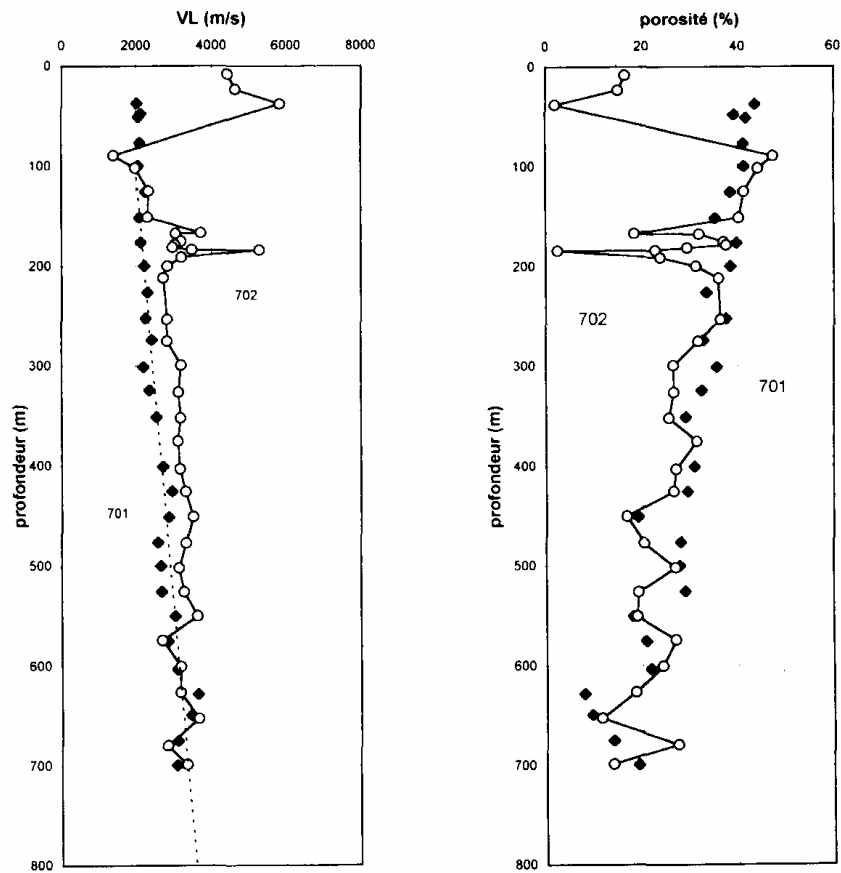


Figure 2-43: Etude de deux forages dans le bassin de Paris
a) vitesses des ondes longitudinales, b) porosités
forage 701 (carrés noirs) et 702 (cercles blancs)
(d'après Bergues & Charpentier, 2000)

Les corrélations vitesse sonique / porosité se confirment même au niveau des anomalies locales rencontrées vers 200 m de profondeur dans le forage 702.

3 LA CRAIE COMME ROCHE RESERVOIR PETROLIER

Ce chapitre a pour but de décrire le cadre dans lequel se situent les études des propriétés mécaniques des craies, objet principal du mémoire. Il sera exclusivement consacré aux gisements situés au milieu de la Mer du Nord, dont Ekofisk est le principal.

La géologie de la Mer du Nord, la genèse des gisements et les problèmes posés sont d'une grande complexité et, pour des raisons de concision, de nombreuses simplifications seront faites et de fréquents raccourcis empruntés.

La carte générale des gisements (Figure 3-1) donne la position des principaux champs pétroliers et gaziers de Mer du Nord.

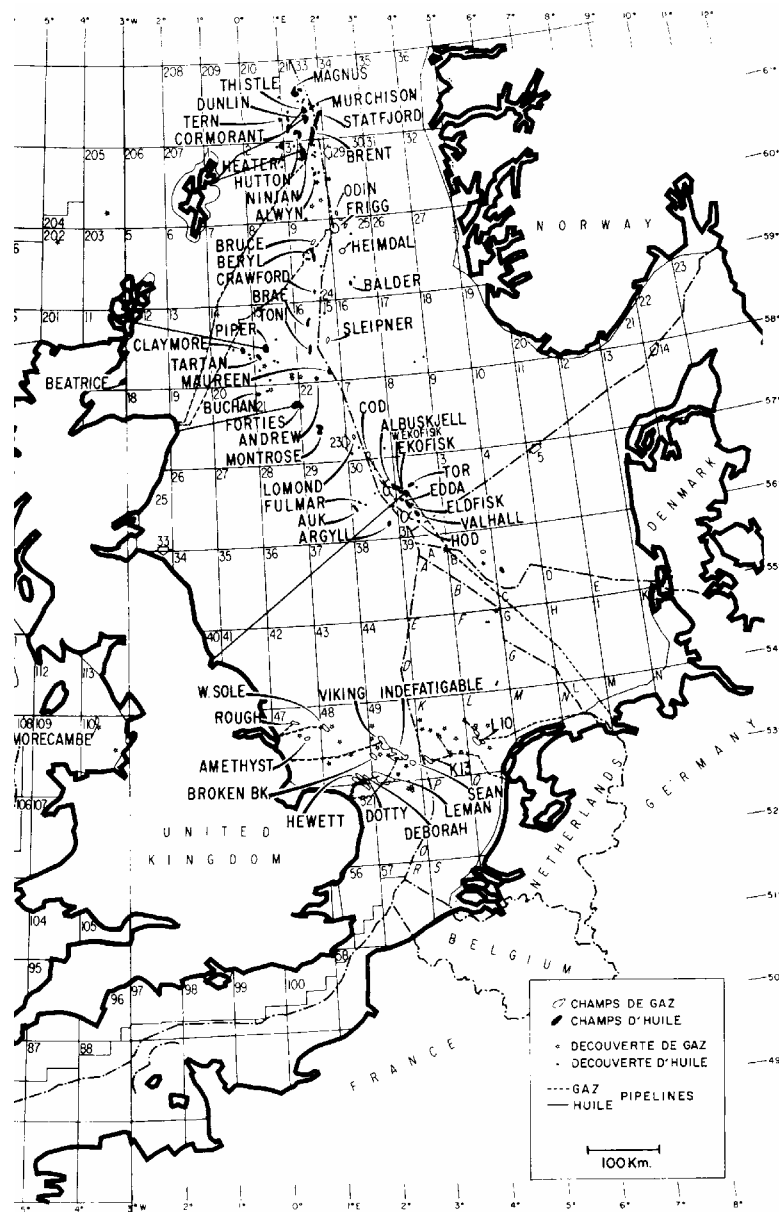


Figure 3-1: Champs pétroliers de Mer du Nord (D'après Masson et al., 1980)

3.1 Géologie

Le cadre géologique des gisements de pétrole en Mer du Nord en général et en réservoirs crayeux en particulier a fait l'objet de nombreuses publications qui ont fourni la matière de ce chapitre.

En particulier, les études faites par les géologues de Petrofina ont permis la compréhension globale du problème dès la fin des "golden sixties", époque à laquelle le gisement d'Ekofisk a été découvert. Ces études ont fait par la suite, l'objet de publications de synthèse (Masson et al, 1980, Kennedy, 1985, D'Heur, 1989, Caillet et al., 1996).

Une échelle stratigraphique simplifiée (Tableau 3-1) permet de situer les événements.

Tableau 3-1: Echelle stratigraphique simplifiée

Evénements tectoniques	Echelle stratigraphique		Age (Ma)	Dépôts en relation avec Ekofisk
	Quaternaire	Holocène		Couverture
		Pléistocène	1.75	
	Tertiaire	Néogène	23	
Phase Laramide du plissement alpin		Paléogène (Danien en base)	65	Réservoir
	Secondaire	Crétacé	135	
Diapirisme, fractures...		Jurassique	203	Argiles (roches mères)
Graben, Subsidence...		Trias	250	
	Primaire	Permien	295	Evaporites (Sels)
Cycle hercynien		Carbonifère	355	
		Dévonien	408	
		Silurien	435	
		Ordovicien	500	
Cycle calédonien		Cambrien	540	

L'histoire principale des gisements pétroliers en formations crayeuses de Mer du Nord commence au Permien, tout à la fin de l'ère Primaire. La région est alors constituée, au Nord, de roches précambriennes et de restes de l'orogénèse calédonienne, au centre, d'un vaste bassin de roches du Houiller limité au Sud par le front varisque (hercynien).

Après des dépôts continentaux, le bassin a été envahi par la mer, à la fin du Permien. La principale caractéristique de ces dépôts est la présence d'épaisses couches de halite et autres évaporites qui, dès que le poids des sédiments surincombants a été suffisant (au Trias), ont pu fluer et donner les formes en dômes et gonflements caractéristiques de l'halokynèse (Figure 3-2).

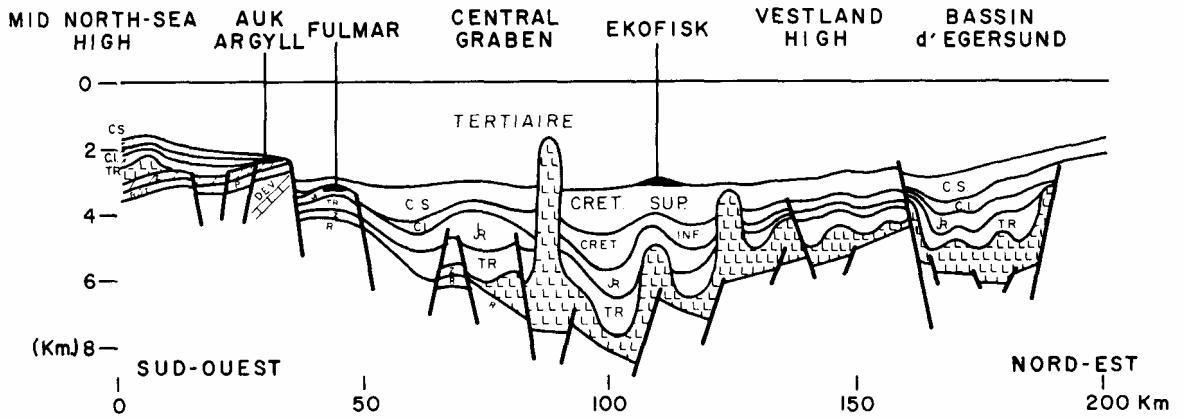


Figure 3-2: Coupe géologique SW- NE passant par le centre de la Mer du Nord (Masson et al., 1980)

En même temps, une tectonique d'extension, liée à l'éloignement de la plaque américaine (rifting nord Atlantique), entraîne la formation de grabens dont le plus important est le complexe Viking Graben - Central Graben (Figure 3-3).

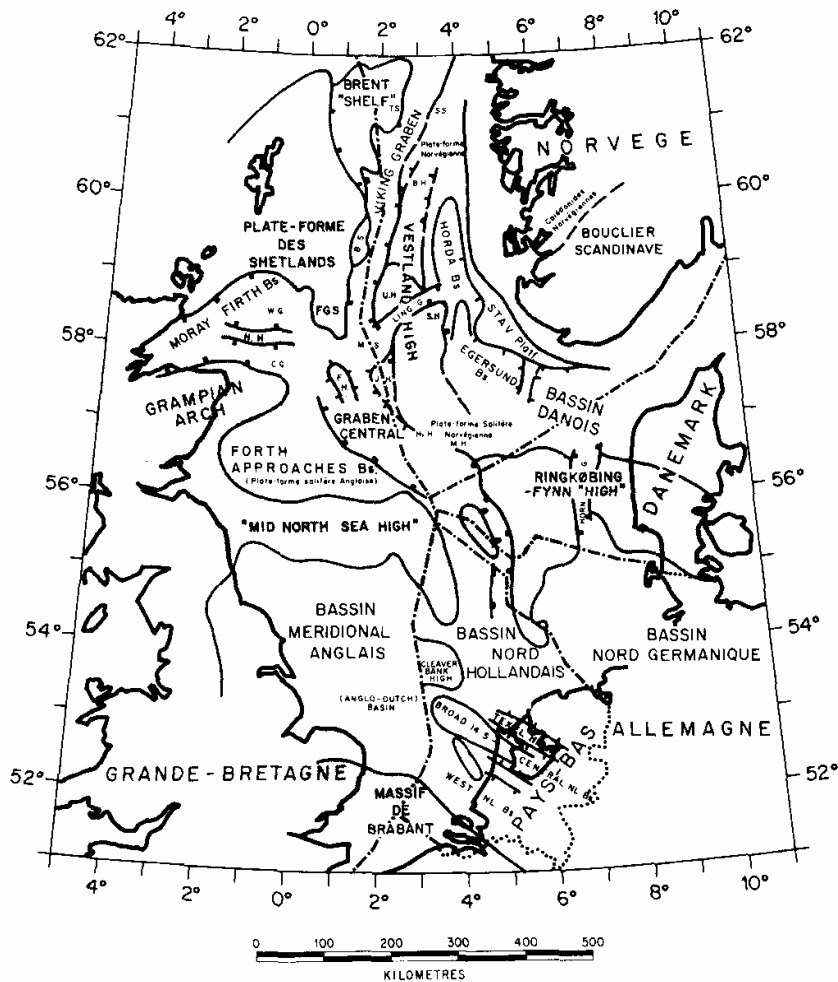


Figure 3-3: Traits majeurs de l'architecture du soubassement de la Mer du Nord avant la transgression crétacée (Masson et al., 1980)

Ensuite, viennent les dépôts sableux (fluviaux) du Trias, puis argileux (marins) du Lias puis une exondation et érosion avec dépôts dans les bassins situés au Nord et au Sud.

La subsidence reprend au Jurassique moyen et à la fin du Jurassique (Kimmeridgien) la mer atteint son extension maximale dans les grabens avec la sédimentation en eau profondes d'argiles noires, très riches en matières organiques qui sont à l'origine de la majeure partie du pétrole de mer du Nord.

Une phase majeure du rifting nord Atlantique entraîne une série de cassures dans les compartiments des grabens, les rejets des failles pouvant atteindre 2000 m. Cette subsidence des compartiments faillés au centre des grabens s'accompagne d'une surrection des flancs et des zones au Sud de la mer du Nord, constituant ainsi une barrière séparant le domaine geosynclinal alpin de la mer du Nord.

Les dépôts des mers du Crétacé remplissent la dépression existant à la fin du Jurassique, par des argiles et des marnes dont l'épaisseur dépasse 1000 m au centre des grabens.

La subsidence continue jusqu'à la fin du Crétacé. C'est alors qu'apparaissent des faciès crayeux extrêmement purs indiquant une transgression généralisée sur toute la région. Elle prend fin au début du Paléocène, plus précisément au Danien, durant lequel se déposent les dernières formations crayeuses. Entre la fin du Maastrichtien et le Danien, une période d'exondation forme un hard-ground (similaire à celui qui sépare en Belgique le Campanien du Maastrichtien). La base du Danien est formée d'une vingtaine de mètres de craies argileuses actuellement pratiquement imperméables, appelée "tight zone". Des craies pratiquement pures surmontent cette zone. A la fin du Danien, les craies s'enrichissent progressivement en argiles et passent à des marnes puis à des argiles franches.

Le bassin de la mer du Nord s'est ainsi transformé, au début du Tertiaire, en une cuvette symétrique qui s'est progressivement remplie des 3000 m d'argiles constituant la couverture actuelle des réservoirs pétroliers au centre de la Mer du Nord.

3.2 Le champ d'Ekofisk

Le champ d'Ekofisk est situé au centre de la Mer du Nord, dans la zone du Graben Central, en secteur norvégien (Figure 3-4).

Il est entouré de quelques autres champs, eux aussi situés en formations crayeuses. La position de ces gisements, au centre du graben, s'explique par la possibilité de connexion avec les roches-mères matures du Jurassique (Spencer et al., 1996).

Le gisement d'Ekofisk, un des 100 plus importants au monde²³, a une forme elliptique orientée environ N-S, de quelques 8 km de long sur 5 km de large.

²³ environ 2.4 milliards de m³ de pétrole (15 milliards de barils) et 185 milliards de m³N de gaz (le m³N est défini à la pression atmosphérique et à 15°C).

Les craies formant le réservoir ont une épaisseur d'environ 300 m. La forme en dôme, due à l'halokynèse, fait que l'épaisseur apparente totale est de l'ordre de 600 m. La couverture argileuse est épaisse de 3000 m.

Les plates-formes d'exploitation reposent sur le fond de la mer, à 70 m de profondeur (Figure 3-5).

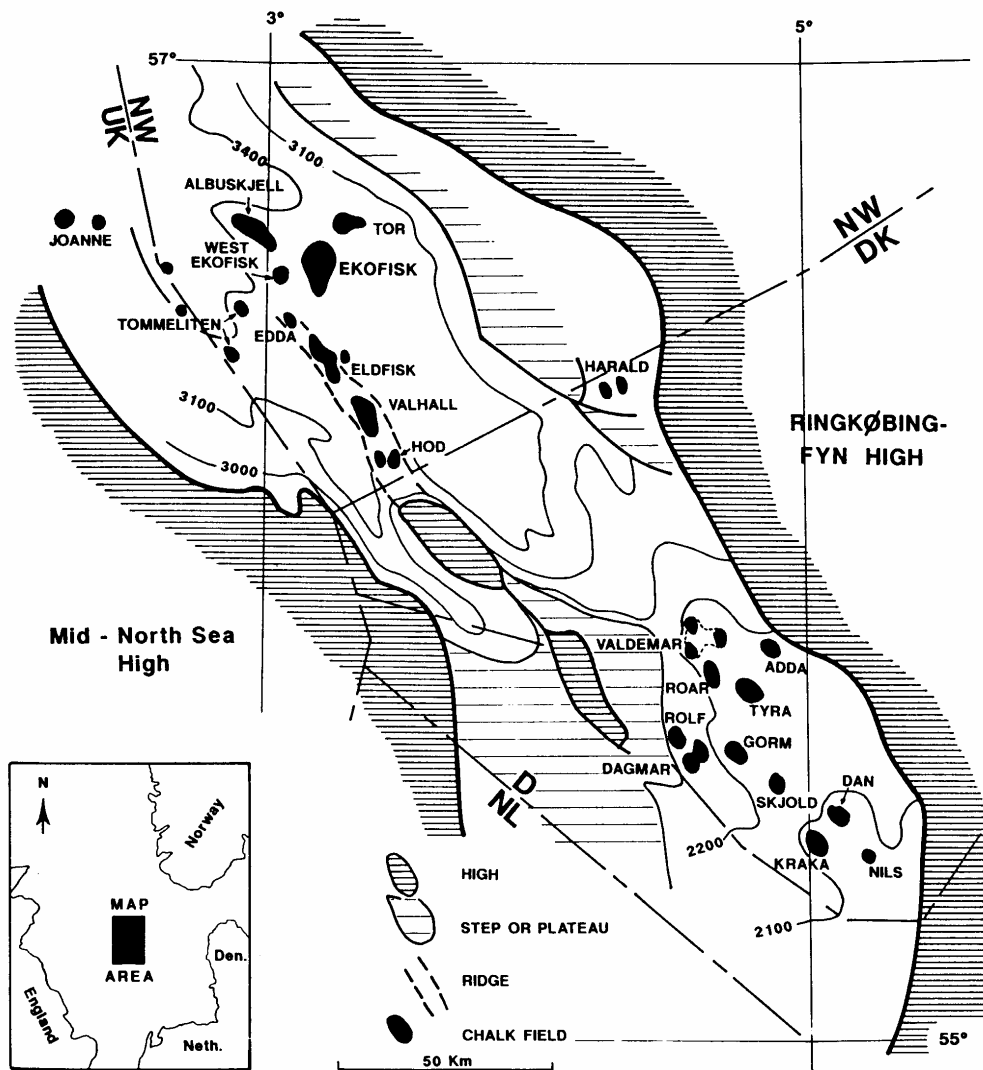


Figure 3-4 Situation des champs pétrolier dans la craie en Mer du Nord (D'Heur, 1989)

Au point de vue géologique, les formations crayeuses appartiennent au Maastrichtien (*formation Tor*) et au Danien (*formation Ekofisk*), les deux ensembles étant séparés par la "Tight Zone".

L'échelle stratigraphique détaillée des formations et la terminologie utilisée par le Joint Chalk Research (utilisée ici) sont repris ci-dessous (Figure 3-6).

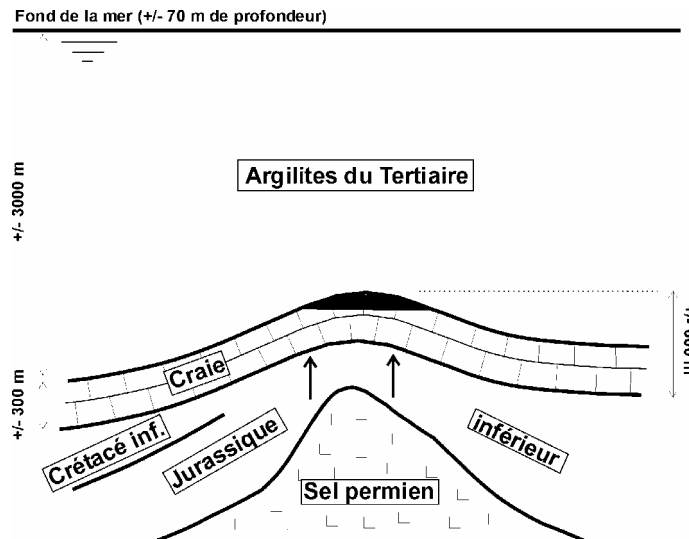


Figure 3-5 : Coupe schématique du champ d'Ekofisk (d'après Masson et al., 1980)

TIME SCALE Gradstein et al., 1995	AGE		JCR NANNO. ZONES this study	JCR proposed FORMATIONS this study	North Sea formal FORMATIONS Isachsen and Tonstad, 1989	Danish informal Chalk units Lieberkind et al., 1982	UK formal FORMATIONS Lott and Knox, 1994
60.00	L. PAL.	THANETIAN	NNTp6 - 9	VÅLE	LISTA / VIDAR	NORTH SEA MARL	MAUREN
59.00			EARLY PALEO- CENE	DANIAN	NNTp6		
61.00	NNTp4						
65.00	NNTp3						
	NNTp2						
70.00	MAASTRICHT.	TOR	UC20	TOR	TOR	CHALK-5 UNIT	ROWE
			UC19				
			UC18				
			UC17				
			71.30			UC16	
80.00	CAMPANIAN	MAGNE	UC15	MAGNE	HOD	CHALK-3 UNIT	JUKES
			UC14				
			UC13				
			UC12				
83.50	SANTONIAN	UC11	NARVE	NARVE	CHALK-2 UNIT	LAMPLUGH	
85.80	CONIACIAN	UC10					
89.00	TURONIAN	UC9					
93.50	CENOMANIAN	HIDRA	UC8	HIDRA	HIDRA	CHALK-1 UNIT	HIDRA
			UC7				
			UC6				
98.90			UC4 & 5	BLODØKS	BLODØKS		
			UC3				
			UC2				
			UC1				

Figure 3-6 : Cadre stratigraphique du JCR (Fritsen et al., 2000)

Le *champ* d'Ekofisk a été découvert à la fin 1969, à l'occasion, en fait, d'un forage destiné à reconnaître les formations gréseuses du Paléocène.

En effet, dans des conditions normales, la craie à 3000 m de profondeur ne devrait pas avoir une porosité supérieure à 10% du fait de la compaction et de la diagenèse. Or les craies d'Ekofisk ont des porosités atteignant 48%.

En fait, l'explication réside dans la constitution du sédiment crayeux (plaquettes et pores micrométriques) et dans le mode de mise en place et de recouvrement de ces sédiments.

La porosité initiale de la boue de coccolithes qui constituera la craie peut atteindre 80%. Au fur et à mesure de l'enfouissement, la diagenèse s'opère ensuite par expulsion de la phase liquide (compaction mécanique - "consolidation" en mécanique des sols) et par compaction chimique.

Cette dernière se produit selon un processus en 3 phases :

1. dissolution de la craie aux contacts intergranulaires (phénomène de dissolution sous pression)
2. migration de la calcite dissoute (sur des distances allant du μm^{24} au m)
3. précipitation de cette calcite dissoute, dans les zones à moindre pression (pores, fissures)

A Ekofisk, la diagenèse ne s'est pratiquement pas produite au centre du gisement et relativement peu sur les bords.

Les causes en sont :

- la nature minéralogique des fragments de coccolithes : la présence de Mg dans les plaquettes de calcite contrarie la diagenèse (Scholle, 1977);
- l'enfouissement rapide de sédiments fins, peu perméables, au sein de formations argileuses tend à entraver l'expulsion du fluide interstitiel et donc à empêcher la compaction mécanique;
- la migration des hydrocarbures au sein de la craie, assez tôt dans les processus diagénétiques, contribue à bloquer les phénomènes de compaction chimique.
- les conditions de mise en place des boues de coccolithes, principalement par glissements et turbidites, ces matériaux remaniés ayant une plus grande résistance à la réduction de porosité par compaction. Ces conditions de mise en place ont été détaillées (D'Heur, 1989) et le bloc diagramme (Figure 3-7) en montre la complexité.

²⁴ la migration ultracourte à partir d'un point de contact peut conduire à la soudure de ce point. C'est ce processus qui est évoqué pour expliquer les "ponts de calcite" (calcite bridge - spot welding) qui pourraient intervenir dans la résistance de la craie.

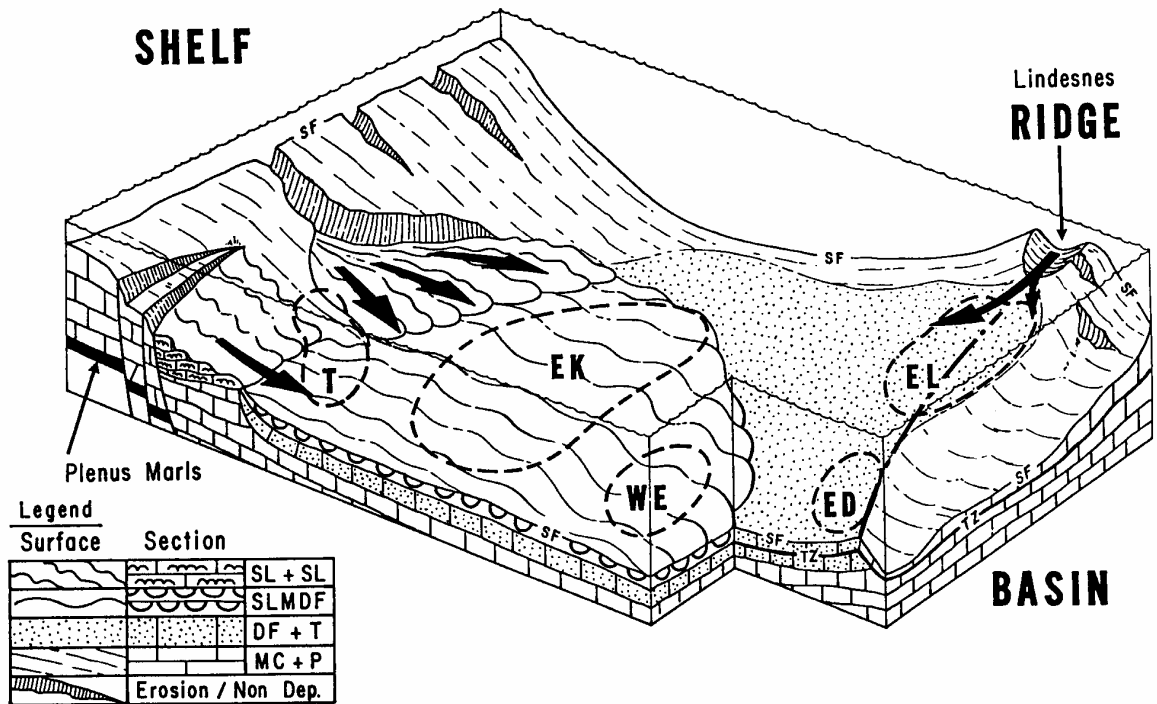


Figure 3-7 : Modèle de sédimentation de la craie au début du Danien (D'Heur, 1989)

Dans la légende du bloc diagramme, les lettres ont la signification suivante :

SL + SL = slides and slumps

SLMD = massive debris flows, often slumped

DF + T = debris flows + turbidites

MC + P = mud clouds deposits and pelagic chalk.

Dans le bloc diagramme lui-même, les champs sont indiqués par les lettres:

T (Tor), EK (Ekofisk), WE (West Ekofisk), ED (Edda), EL (Eldfisk)

Leurs limites sont indiquées par les lignes en pointillés

On a aussi :

SF : Sea Floor (au début du Danien)

TZ : Basal Danian Tight Zone

3.3 Problèmes - la "subsidence"

De nombreux problèmes liés à la mécanique des craies se posent dans les réservoirs de Mer du Nord. Les principaux sont (Figure 3-8, Andersen, 1995):

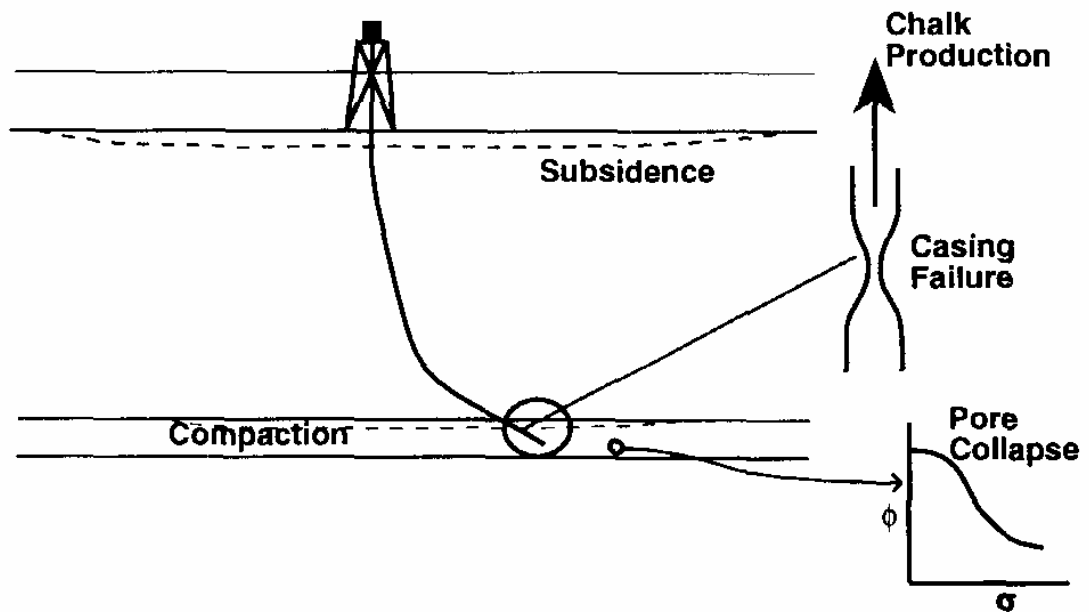


Figure 3-8 : Problèmes posés en cours d'exploitations de gisements pétroliers crayeux (d'après Andersen, 1995)

- les "casing failures" ou "casing collapses" ou ruptures de tubages survenant suite à des efforts exagérés exercés sur les tubages des puits, engendrés par les déformations excessives des craies du réservoir aux alentours des puits;
- les productions de craie, qui parfois, envahit le puits à la place du pétrole, et le colmate. Ce phénomène particulier, analogue à une liquéfaction sera étudié au chapitre 5;
- les problèmes de compaction - subsidence, détaillés ci-après

Les problèmes liés à la subsidence sont les plus préoccupants car celle-ci concerne l'ensemble du site, les deux autres problèmes n'affectant que localement la production (même si le forage d'un nouveau puits, rendu nécessaire par le collapse ou le colmatage peut coûter plusieurs dizaines de millions de dollars).

Notons que le terme "subsidence" utilisé ici a son origine dans la terminologie anglo-saxonne. En français, "subsidence" a une connotation géologique. Il serait plus correct d'utiliser le mot "tassement" ou "affaissement" mais nous nous conformerons à l'usage en utilisant le mot "subsidence" pour parler du phénomène d'enfoncement d'origine anthropique du niveau du fond de la mer.

Le champ d'Ekofisk a été mis en exploitation à la mi-1971. A cette époque, la pression de l'huile dans la craie était de l'ordre de 48 MPa²⁵. La déplétion (diminution de pression en relation avec les prélèvements) durant les premières années d'exploitation ont amené cette pression de pores à une valeur de l'ordre de 25 MPa (24 à 27) en 1985 (Wiborg & Jewhurst, 1986) . Le diagramme ci-après (Figure 3-9) montre la pression dans le réservoir en 1971 et en 1985. On y voit aussi la manière dont la pression évolue en fonction de la profondeur dans le recouvrement, en fonction des degrés de consolidation, des effets de gaz etc.

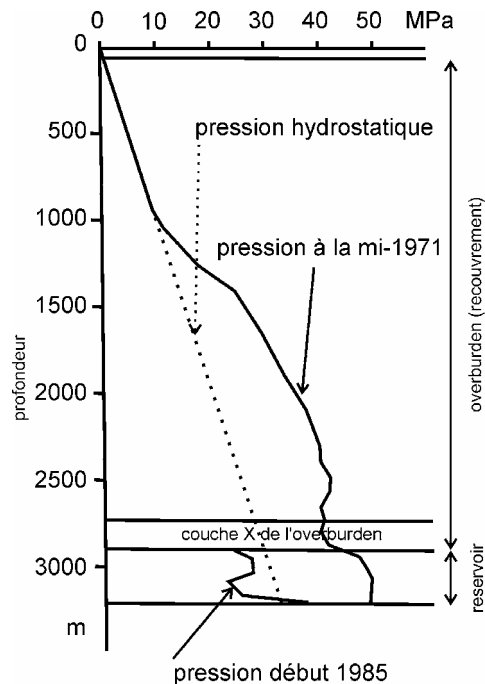


Figure 3-9: Pressions dans le gisement d'Ekofisk en 1971 et en 1985 (d'après Fonder et al., 1988)

L'évolution des pressions dans le réservoir, due à l'exploitation, entre 1971 et 1985, a d'abord été assez lente durant les 6 premières années. La déplétion, a été ensuite, en moyenne d'environ 2MPa par an (soit environ $6 \cdot 10^{-8}$ MPa/s) Ce chiffre est important car il donne la vitesse *réelle* de mise en charge des craies dans le réservoir (à comparer aux $1 \cdot 10^{-3}$ MPa/s utilisés pour les essais de laboratoire).

En novembre 1984, une subsidence du fond de la mer a été constatée²⁶.

Elle était de 3 m en 1985 avec un taux de 0.5 m par an.

²⁵ La contrainte verticale totale était (et est restée) de 60 MPa, la contrainte horizontale était de 55 MPa, l'état de contrainte étant supposé quasi isotrope.

²⁶ La petite histoire dit qu'un technicien, un jour de mer calme, a remarqué que certains éléments du tank de stockage (énorme structure cylindrique posant sur le fond de la mer) n'étaient plus visibles au dessus du niveau de la mer et que c'est à ce moment que la subsidence a été identifiée...

Cette subsidence est la répercussion en surface de la compaction du réservoir crayeux suite à la diminution de la pression interstitielle (voir, par exemple, Teufel et al., 1991). Cette compaction présentait un caractère très classique, avec plastification des craies les plus poreuses et réduction consécutive de la porosité, avec comme conséquence une meilleure récupération primaire.

Néanmoins, la sécurité par rapport aux tempêtes les plus fortes étant de 6 m, au taux de subsidence de 1985, les plates-formes n'auraient pu atteindre sans risque la fin de leur vie, initialement prévue en 2010 (marge de sécurité nulle atteinte en 1991).

De nombreuses études du comportement de la craie et de nombreuses modélisations ont été alors réalisées (voir par exemple LGIH - MSM, 1988) pour prévoir l'évolution possible de la subsidence en fonction de différentes hypothèses d'injection de fluides. Ces modélisations tiennent compte des caractéristiques du réservoir mais aussi des particularités de la couverture (overburden) argileuse qui est loin d'être homogène (présence de petites strates indurées, zone à forte teneur en gaz au centre, etc.). Un exemple de résultats finaux de ces modélisations est donné par le diagramme ci-dessous (Figure 3-10).

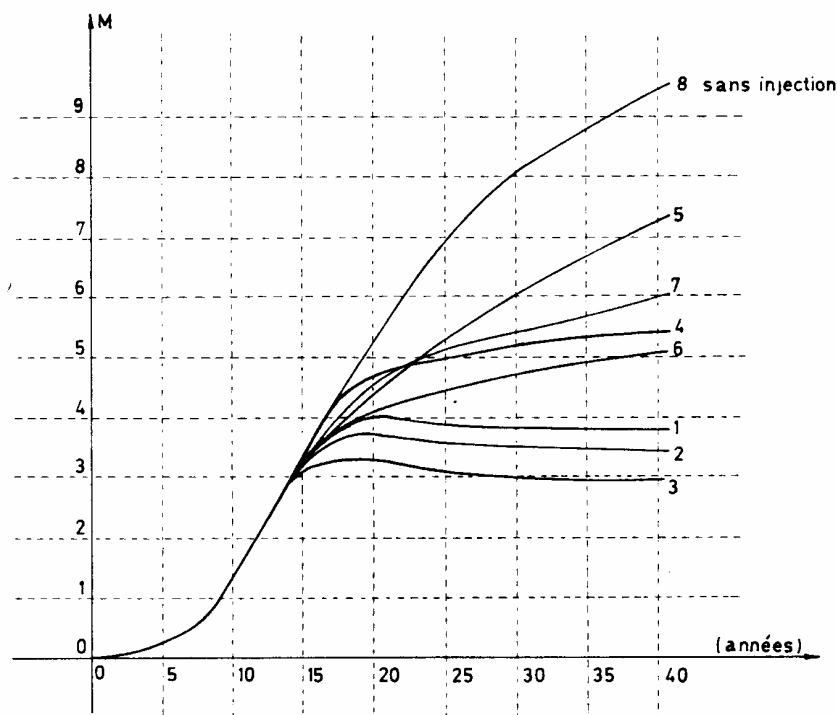


Figure 3-10: Evolution de la subsidence maximum en fonction du temps (l'origine correspond au milieu de l'année 1971, date de début de l'exploitation). Les chiffres de 1 à 7 correspondent à différentes hypothèses de taux d'injections de fluide. La courbe 8 est la prévision de la subsidence en l'absence d'injection. (Charlier, 1987)

En fonction de ces résultats, il a été alors décidé, dès 1986 de procéder à des injections, d'abord de gaz puis, en 1987, d'eau de mer, afin de maintenir la pression à la valeur atteinte (le volume d'eau injecté correspond exactement au volume d'huile sorti). Le but de l'opération était double : arrêter ou limiter la subsidence et augmenter la récupération du pétrole. Ce dernier aspect a donné d'excellents résultats (Hermansen et al., 2000).

En même temps, en 1986, une gigantesque opération ("uplift"), remontait simultanément (en 2 jours) de 6 m l'ensemble de plates-formes du complexe d'Ekofisk, afin de rétablir la marge de sécurité par rapport aux tempêtes extrêmes.

Cependant, malgré les injections d'eau de mer (en fait **à cause d'elles**), la subsidence s'est prolongée à un rythme à peu près identique (de l'ordre de 0.5 m par an) jusqu'à présent. et atteignait 6.5 m en 1996.

La raison principale en est la sensibilité de la craie qui se compacte nettement lors de l'injection d'eau (on dit aussi en français "qui collapse lors du waterflooding") (Maury & Piau, 1996).

Le problème de la subsidence a entraîné de nombreux travaux, des coûts astronomiques d'abord l'uplift des plates-formes en 1986 (pour quelques 5 milliards de couronnes norvégiennes) et finalement, la construction du nouvel ensemble Ekofisk2 (Photo 4-1), en service aujourd'hui, dont la revanche au dessus de l'eau est d'une vingtaine de mètres.

Ce nouvel ensemble est prévu pour une exploitation jusqu'en 2050.



Photo 3-1 : Ekofisk 2 (Document PPCN)

Les travaux sur la craie qui continuent d'être menés, entre autres, dans le cadre du projet européen "Pasachalk2²⁷" contribuent à répondre à la question :

20 m de sécurité suffiront-ils pour tenir jusqu'en 2050?

²⁷ Le projet Européen Pasachalk 2, 2000-2003, a comme partenaires TotalFinaElf Exploration Norway a/s (Norvège), l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - CERMES (France), l'Université de Liège-DIG et l'Université de Liège-LGIH (cordonateur), les deux derniers partenaires étant, depuis le 1/10/2001 regroupés au sein du département GeoMaC de l'ULg.

4 ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA CRAIE

4.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est de faire le point des recherches effectuées depuis 25 ans, du point de vue de la phénoménologie du comportement mécanique de la craie.

Comme les propriétés des craies s'expliquent à partir de leurs caractéristiques "géologiques", il est logique de commencer par une description des caractéristiques des craies testées, une craie d'affleurement (craie de Lixhe) et deux types de craie de mer du Nord (formation Tor et formation Ekofisk).

Ensuite, l'aspect expérimental sera principalement développé.

L'aspect modélisation, qui a lui seul pourrait faire, et fait d'ailleurs, l'objet de plusieurs thèses, ne sera pas abordé en détails. Cependant, comme l'interprétation d'un phénomène physique quelconque se fait nécessairement par l'intermédiaire d'un modèle (conceptuel, physique, numérique ou le tout simultanément), nous décrirons d'abord le modèle développé au cours du projet "Pasachalk". Ce modèle reprend et synthétise les idées actuelles au sujet de la mécanique de la craie, tout en apportant un complément original (la prise en compte de la succion).

Dans le cadre de ce modèle, seront ensuite présentés

- les déterminations des principaux paramètres du modèle;
- l'influence de divers facteurs propres à la craie (porosité, teneur en silice);
- les interactions fluides squelette, y compris les effets du "waterflooding";
- l'effet de la température;
- le comportement différé (fluage);
- différents aspects spécifiques du comportement de la craie (liquéfaction, désagrégation).

4.2 Caractérisation des craies testées

Les craies généralement testées, même par les laboratoires des compagnies pétrolières, ne proviennent pas toujours des gisements pétroliers. C'est pourquoi, des craies d'affleurement sont utilisées (Vexin, Lixhe, Stevns Klint ou Åalborg).

Aux LGIH, la craie utilisée pour la grande majorité des essais, est la craie d'affleurement de Lixhe.

Quelques craies de Mer du Nord ont été testées, appartenant aux formations *Ekofisk* et *Tor* du gisement d'Ekofisk. La description de ces craies permet de constater la similitude entre la craie d'affleurement et les craies de Mer du Nord (à la mouillabilité près), ce qui justifie la réalisation des essais sur craies d'affleurement.

4.2.1 Craie de Lixhe

Le matériau connu sous le nom de "*craie de Lixhe*" ou de "*craie de Liège*" est une craie d'affleurement provenant de la carrière de la cimenterie C.B.R. à Hallembaye (Lixhe, près de Visé, à une trentaine de km de Liège).

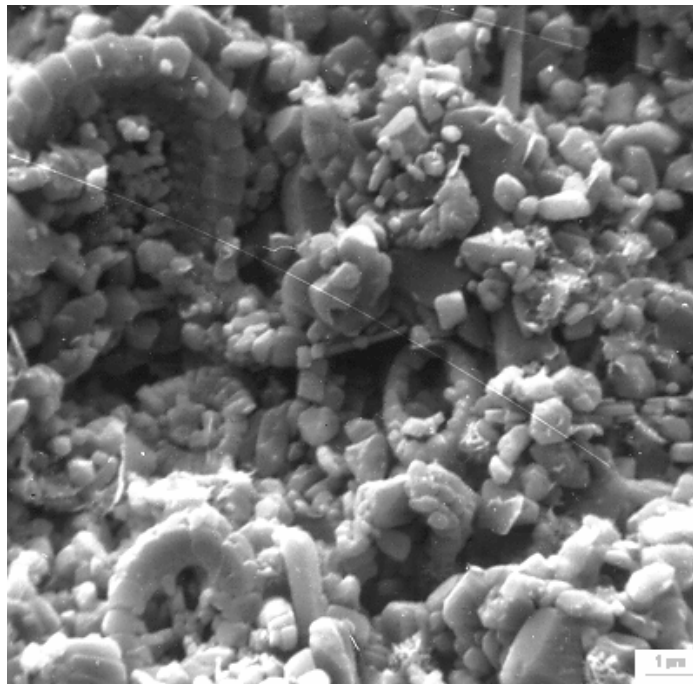


Photo 4-1 : Craie de Lixhe - vue au MEB (échelle indicative)

La craie de Lixhe (Photo 5-1), appartient au Campanien supérieur. Dans l'échelle stratigraphique régionale détaillée, elle se situe dans la formation dite "Zeven wegen chalk" qui est située juste en dessous du hard-ground, appelé "Horizon de Froidmont", qui marque la lacune de sédimentation entre le Campanien supérieur et le Maastrichtien supérieur.

Les caractéristiques de cette craie sont les suivantes : (Tableau 4-1):

Tableau 4-1: Caractéristiques de la craie de Lixhe

Composition moyenne :		
CaCO ₃ :	98.5	%
SiO ₂ :	0.8	%
MgO :	0.2	%
Fe ₂ O ₃ :	0.1	%
P ₂ O ₅ :	0.15	%
Al ₂ O ₃ :	0.15	%
Porosité ²⁸ :	43 (42 à 44)	%
Rayon des pores ²⁹ :	0.5	µm
Perméabilité :	0.1 à 1	mD

Il s'agit donc d'une craie extrêmement pure, avec moins de 0.2 % de SiO₂ et d'Al₂O₃, donc avec très peu d'argiles. Les grains sont majoritairement rhomboédriques.

Comme signalé, les échantillons sont principalement extraits de la carrière C.B.R. de Lixhe mais la relative régularité latérale de l'horizon permet de se procurer une craie pratiquement identique dans des carrières voisines, voire nettement plus loin (comme à Grez-Doiceau, à 80 km de distance).

Cette craie est, ou a été, également utilisée par un grand nombre d'autres laboratoires: Stavanger Collège et IKU (Norvège), Amoco et Phillips Petroleum Company (USA), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées-CERMES, Ecole Polytechnique, Université de Lille-EUDIL, Ecole des Mines de Douai, Ecole des Mines d'Alès (France), ce qui en fait un "standard" international.

4.2.2 Craies de Mer du Nord

Le détail des descriptions des échantillons de craies de Mer du Nord figure dans la publication en annexe (Monjoie et al, 1985a).

En résumé, les formations ont les caractéristiques suivantes :

²⁸ Exceptionnellement, en raison de l'hétérogénéité (voir § 2.4.2.3), des valeurs inférieures, allant jusqu'à 37%, peuvent être constatées.

²⁹ Voir en annexe les courbes porosimétriques réalisées à l'Ecole des Mines de Paris

formation Ekofisk

La formation Ekofisk appartient au Maastrichtien. Elle est très hétérogène, avec d'abondants coccolithes entiers (Photo 5-2).

La teneur en CaCO_3 varie entre 44 % et 93 % (valeur moyenne de l'ordre de 82 %), le SiO_2 pouvant localement atteindre 50 % et l' Al_2O_3 , 7.4%.

Cette craie est siliceuse et parfois légèrement argileuse.

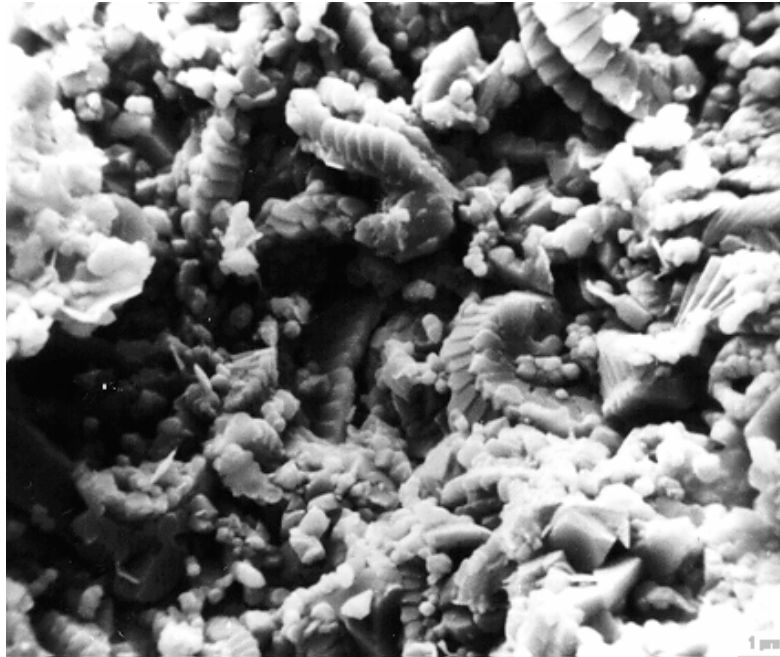


Photo 4-2 : Craie de la formation Ekofisk - vue au MEB (échelle indicative)

Les débris, les grains, sont tantôt arrondis, tantôt rhomboédriques. Les dimensions des grains, les porosités et perméabilités varient selon la morphologie des grains (Tableau 4-2) :

Tableau 4-2 : caractéristiques des craies de la formation Ekofisk fonctions de la morphologie des grains

	Grains	
	rhomboédriques	arrondis
dimension (μm) :	2 et plus	moins de 1
perméabilité (mD) :	0.8 à 5	0.5 à 1.2
porosité (%) :	25 à 42	30 à 45

Les caractéristiques de cette craie ne sont semblables à celles de la craie de Lixhe que par la présence de coccolithes entiers. Elles sont assez différentes pour les autres caractéristiques, de porosité et de teneur en silice en particulier.

formation Tor

La formation Tor appartient au Danien inférieur. Elle est caractérisée par la rareté des coccolithes entiers (Photo 5-3), témoin du mode de mise en place avec remaniement.

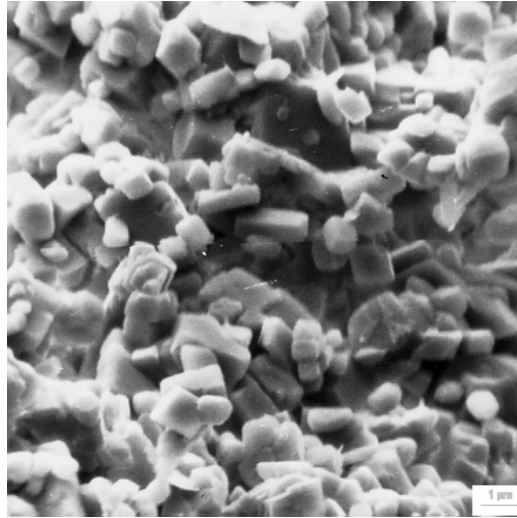


Photo 4-3 : Craie de la formation Tor - vue au MEB (échelle indicative)

La teneur en CaCO_3 varie entre 93 % et 94 % , le SiO_2 étant inférieur à 2-3%, ainsi que l' Al_2O_3 .

Il s'agit donc d'une craie pure, comme la craie de Lixhe.

Les grains, sont rhomboédriques, de 1 à 2 μm , la perméabilité étant de 0.2 à 3 mD et la porosité de 15 à 42 %.

Dans l'ensemble, les caractéristiques de la craie de la formation Tor la rapprochent de la craie de Lixhe.

4.3 Comportement mécanique - description générale

La craie a un comportement mécanique complexe. Indépendamment des interactions fluide - squelette, elle suit des lois constitutives élasto - visco - plastiques, présentant des ruptures fragiles à certains niveaux de contraintes, de la liquéfaction à d'autres.

Il faut signaler que l'effet de viscosité sera souvent passé sous silence pour l'interprétation de la plupart des essais, sauf pour ceux réalisés spécialement à cet effet. Dans la plupart des cas, en effet, la rapidité des essais (durée de quelques minutes à quelques heures) permet de négliger l'effet visqueux.

L'essai le plus aisé à réaliser (en principe) est l'essai de compression simple. Il a fourni les bases des informations sur le comportement de la craie. Compte tenu du chemin de contraintes suivi (voir plus loin), il conduit à une rupture de type *fragile* (ou cassante) par cisaillement (rupture par frottement interne), avec localisation bien marquée de la rupture

La figure suivante (Figure 4-1) donne les résultats d'un ensemble d'essais de compression simple réalisés sur de la craie de Lixhe sèche. Le détail des résultats figure dans la publication en annexe (Monjoie & Schroeder, 1989). Le diagramme présente les modules de déformation et d'élasticité en fonction des contraintes de rupture en compression simple (UCS³⁰).

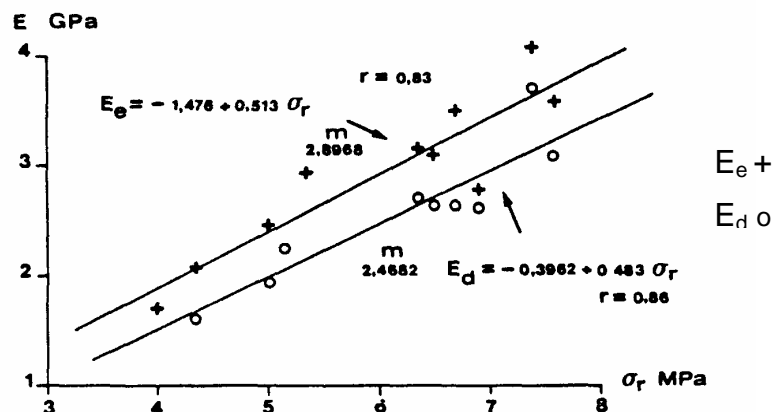


Figure 4-1 : Essais de compression simple sur craie de Lixhe - modules de déformation et d'élasticité (Monjoie & Schroeder, 1989)

On note une dispersion très importante (à porosités voisines) des valeurs de la résistance en compression simple, σ_r , et des modules, E_e et E_d , avec cependant des corrélations excellentes entre les modules et les résistances.

Ceci traduit la *constance de la déformation à la rupture fragile par cisaillement*, ε_r : on a en effet $\varepsilon_r = \Delta\sigma_r / \Delta E = 2 \cdot 10^{-3}$.

³⁰ UCS : Unconfined Compression Strength

En traction, la craie présente une résistance non nulle mais faible, de l'ordre de 0.5 MPa à 0.8 MPa pour la craie sèche, en général déterminée par essais brésiliens (Doremus, 1978; Monjoie & Schroeder; 1989, Risnes et al., 1999b).

Pour des chemins de contraintes plus complexes, du type triaxial³¹, la craie présente un comportement fragile aux faibles pressions de confinement et un comportement élasto - plastique au delà d'un seuil dépendant des paramètres qui seront examinés plus loin.

Les diagrammes contrainte (déviatorique) - déformation (axiale) de craies de Lixhe saturées en Soltrol³² testées en triaxial à différentes pressions de confinement (vitesse d'augmentation du déviateur = 10^{-3} MPa/s) sont donnés ci-dessous (Figure 4-2).

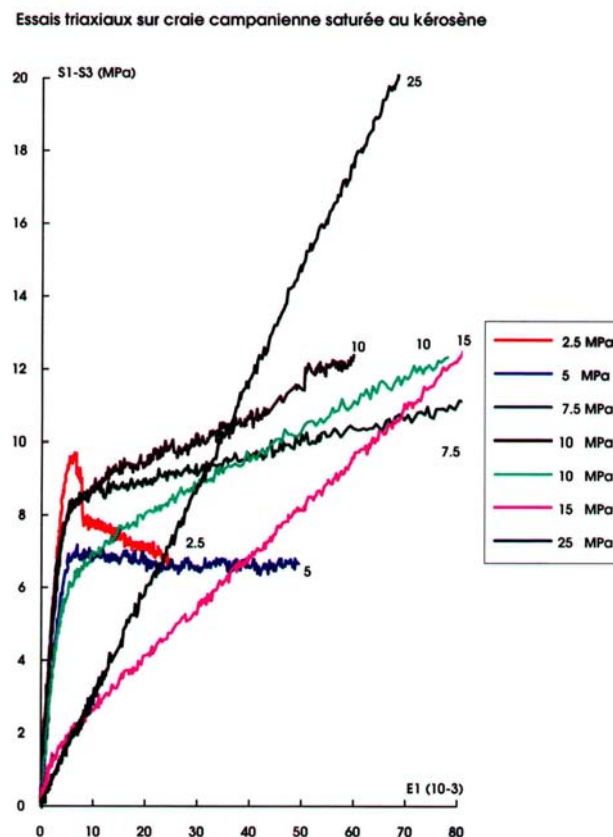


Figure 4-2 : courbes contrainte - déformation de craies de Lixhe saturée au Soltrol - essais triaxiaux à différentes contraintes de confinement

Aux faibles contraintes de confinement (2.5 MPa et 5 MPa), la rupture est fragile, avec de moins en moins de radoucissement et un déviateur à la rupture

³¹ L'essai triaxial (en fait "biaxial") est compris dans l'acception habituelle : mise en contrainte isotrope puis maintien de la pression de confinement et augmentation de la contrainte déviatorique.

³² Le Soltrol™ est un kérosène produit par PPCo qui est utilisé, en laboratoire, à la place du pétrole, pour des raisons de disponibilité et de répétabilité. Il a des propriétés de mouillabilité et de viscosité qui permettent de l'utiliser en lieu et place des huiles légères, telles le Brent de Mer du Nord. La fiche technique du Soltrol 170 utilisé aux LGIH figure en annexe 3.

qui diminue. La contrainte de confinement augmentant, la rupture devient de plus en plus plastique, avec écrouissage tandis que la phase linéaire pseudo-élastique se réduit (la valeur du déviateur correspondant à l'entrée en plasticité diminue). Pour 25 MPa de pression latérale, il n'y a plus de phase linéaire pseudo-élastique, la craie est entrée en plasticité au cours de la montée hydrostatique (= isotrope).

Ce passage en plasticité est illustré par le diagramme contrainte - déformation d'un essai de compression isotrope sur une craie de Lixhe saturée en Soltrol (essai drainé, vitesse de mise en charge 10^{-3} MPa/s) (Figure 4-3).

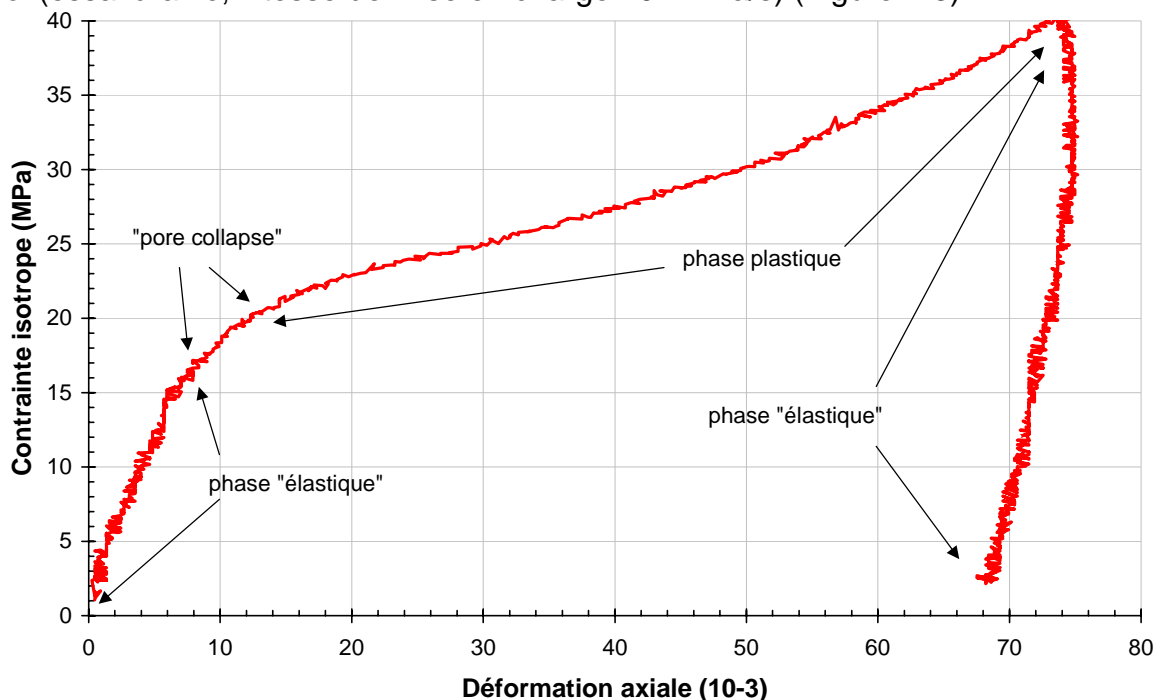


Figure 4-3 : Essai de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Soltrol "élasticité", "pore collapse", plasticité

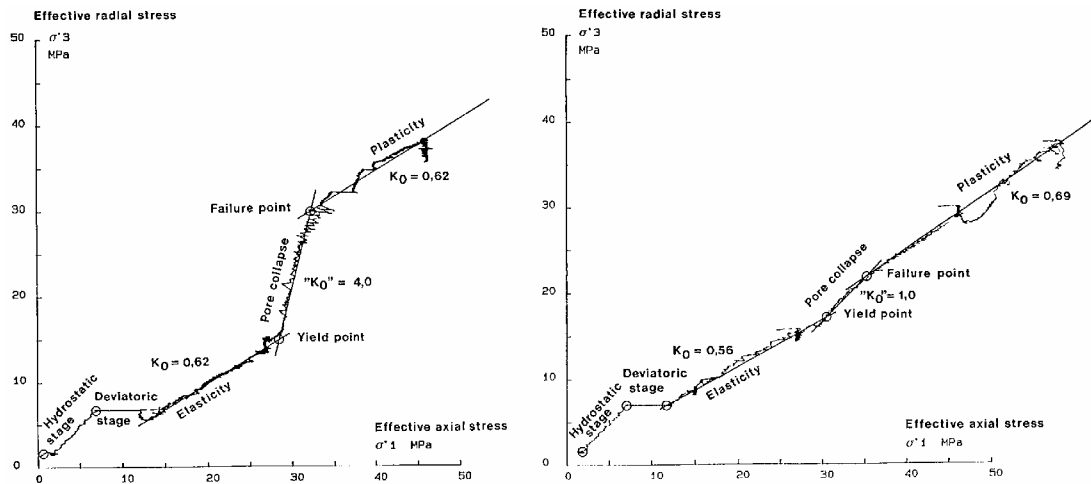
Lors de cet essai, la craie passe successivement par un comportement dit "élastique" (en fait "pseudo-linéaire non réversible").

L'entrée en plasticité se marque par le "pore collapse" (effondrement poreux").

Le "pore collapse" est un aspect important du comportement de la craie dont l'explication est encore à donner (Jones & Leddra, 1989, Risnes et al., 1994). Les détails sur le "pore collapse" sont donnés dans deux publications en annexe (Monjoie, Schroeder et al., 1990, Schroeder, 1995).

En résumé, on constate que le début et la fin de cette phase d'effondrement poreux ne se marquent pas bien sur un diagramme de type "contrainte - déformation", tel celui présenté ci-dessus. En revanche, le "pore collapse" se marque plus clairement sur des diagrammes de type contrainte - contrainte ($p' - q^{33}$ ou $\sigma'_1 - \sigma'_3$) (Figure 4-4).

³³ p : contrainte moyenne = $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, p' = contrainte moyenne effective = $p - u$
 q = déviateur = $\sigma_1 - \sigma_3$ (ou $\sigma'_1 - \sigma'_3$)



a) éch. R2-6725.6, porosité :47.3 % b) éch. B3-11139, porosité 39.4 %

Figure 4-4 : Diagrammes contrainte effective radiale fonction de la contrainte effective axiale pour deux craies de Mer du Nord (D'après Da Silva et al, 1990)

Sur cette figure, on voit une des principales caractéristiques de cette phase : la variation plus ou moins brutale du rapport entre contraintes effectives verticale et horizontale. Cette variation est particulièrement spectaculaire sur des échantillons à très forte porosité mais diminue d'intensité au fur et à mesure que la porosité décroît.

Avant le "pore collapse", le rapport, K_0 , entre les contraintes vaut, en valeur incrémentale, de l'ordre de 0.6, ce qui correspond à un coefficient de Poisson de l'ordre de 0.38 (valeur fort élevée mais incrémentale, une valeur globale conduisant à ν de l'ordre de 0.33). Au cours du "pore collapse", ce rapport entre les contraintes augmente rapidement, avec une valeur (incrémentale) $K_0 = 4$ (ce qui est sans signification au point de vue de la mécanique des milieux continus.) pour la craie très poreuse à $K_0 = 1$ pour la craie de porosité 39.4 %.

A la fin du "pore collapse", pour la craie très poreuse, les contraintes effective horizontale et verticale sont quasi égales (état de contraintes hydrostatiques). Comme les essais étaient conduits avec contrôle de la pression interstitielle, il ne s'agit donc pas d'un report des contraintes sur le fluide de saturation mais bien d'une redistribution de la contrainte intergranulaire.

Au delà de la phase de "pore collapse", en phase plastique, on retrouve pratiquement la même valeur de K_0 qu'au cours de la phase "élastique".

Au microscope électronique à balayage, le "pore collapse" est difficile (voire impossible) à visualiser. En effet, au cours de cette phase, la variation de porosité n'est que de l'ordre de 1%, ce qui est difficile à apprécier sur une image MEB, d'autant qu'il n'est évidemment pas possible de faire l'image d'un même point avant et après l'essai. De plus, il se pourrait que l'effondrement affecte préférentiellement certaines zones, initialement plus poreuses et ne modifie pratiquement pas les autres zones. Ceci explique pourquoi, il est impossible au MEB, de distinguer une craie intacte d'une craie entrée en plasticité.

4.4 Le modèle Pasachalk

Les lois de comportement sont généralement déduites des observations expérimentales, pour tenir compte des réalités physiques. Il serait donc logique de présenter d'abord tous les résultats expérimentaux avant de décrire le modèle utilisé.

En fait, comme annoncé plus haut, au § 4.1, à la lumière de la description générale du comportement mécanique qui vient d'être exposée, nous commencerons par décrire le modèle (qui, bien évidemment, a été élaboré progressivement au cours du projet *Pasachalk*). Les phénomènes expérimentaux dont il sera question ensuite seront ainsi mieux compris grâce à leur interprétation dans le cadre de ce modèle.

4.4.1 Aperçu de différents types de modèles

En général, jusqu'au début des années 70, le comportement mécanique de la craie n'était étudié qu'à de faibles niveaux de contraintes et le critère de Mohr-Coulomb suffisait à le décrire (Baguelin, 1973).

Avec les études plus poussées sur la craie, il était indispensable de disposer de modèles décrivant le comportement complexe de ce matériau et des lois de comportement plus élaborées, souvent issues d'études en mécanique des sols, sont apparues.

Les lois de comportement s'expriment comme une relation³⁴ (fonctionnelle) entre le tenseur de contraintes en un point et les déformations en ce point.

Selon le phénomène étudié et la démarche adoptée pour leur élaboration, on peut avoir différents types de modèles, les modèles élasto - plastiques étant parmi les plus utilisés.

Un matériau est dit élasto - plastique lorsqu'il présente des déformations réversibles et irréversibles, la réponse du matériau aux sollicitations étant indépendante du temps (de la vitesse de mise en charge). Les déformations irréversibles sont définies par la notion de *surfaces de charge* qui dépendent de la position des contraintes dans l'espace des contraintes principales (ou autre espace des contraintes) et de la direction de l'incrément de contrainte. La *règle d'écoulement* donne la direction de la déformation plastique et les règles d'évolution des *paramètres d'écrouissage* donnent son amplitude.

Il existe un certain nombre de lois élasto-plastiques applicables aux matériaux granulaires saturés tels que la craie, des modèles de la famille Cam-Clay (par exemple Charlier & Radu, 1988; Retth & Teufel, 1992) et des modèles à frottement interne tels que Mohr-Coulomb, Drucker-Prager (1952), Van Eekelen (1980), Plasol (Barnichon, 1998).

Le modèle de Laderock (Shao, 1992) est basé sur le modèle de Lade (Lade, 1977) qui décompose la déformation en une déformation élastique et en deux composantes de la déformation plastique, une composante plastique isotrope (volumique) et une composante déviatorique.

³⁴ la *rhéologie* consiste en l'étude de ces relations

Ces modèles sont applicables aux milieux saturés et doivent donc être adaptés pour tenir compte d'une situation multiphasique. Certains modèles (par exemple : Shao et al., 1993; Papamichos et al., 1997; Piau & Maury, 1994; Piau & Maury, 1995; Piau et al., 1998) prennent cet aspect en compte mais en général, utilisent un "saut" pour passer d'une saturation en huile à une saturation en eau, sans considérer les états intermédiaires. Un tel modèle est décrit dans la publication en annexe (Schroeder & Shao, 1996).

Le modèle Pasachalk incorpore la notion de fluide multiphasique en proportions variables. Pour cela, le modèle Pasachalk utilise la notion de succion (vue au § 2.5.3.1.) qu'il prend en compte en suivant l'approche du modèle de Barcelone (Alonso et al., 1990).

4.4.2 Le modèle de Barcelone

Le modèle de Barcelone est initialement destiné aux sols fins insaturés.

La similitude entre le comportement des sols insaturés et celui des craies saturées par divers fluides mouillants et non mouillants a conduit (Delage et al., 1986) à appliquer la notion de succion à la mécanique de la craie.

La publication en annexe (Delage, Schroeder & Cui, 1996) donne les détails de la démarche et décrit le modèle utilisé.

L'idée de base du modèle élasto - plastique de Barcelone est de considérer la succion comme variable indépendante, au même titre que la contrainte.

On définit (Figure 4-5) sur un plan S / p (succion /: contrainte) une zone élastique délimitée par deux surfaces de charge, SI (Suction Increase) qui gère la plastification par la succion et LC (Loading Collapse), qui gère la plastification par la contrainte. Ainsi, lors d'une montée en succion sous contrainte constante, avant de toucher SI, on ne produit que des déformations élastiques et une fois SI touchée, on produit des déformations élasto- plastiques.

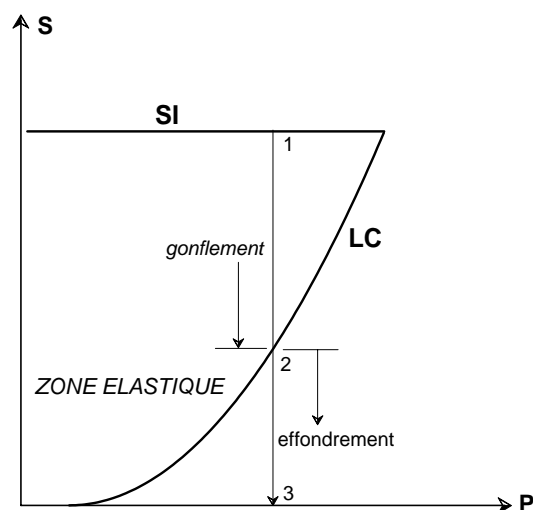


Figure 4-5: Modèle de Barcelone - surfaces de charge LC et SI - description des phénomènes de gonflement et d'effondrement

La courbe LC a une double fonction: elle est à la fois la frontière entre l'élasticité et la plasticité lors des chargements, et la frontière qui sépare la zone de gonflement de la zone d'effondrement lors des remouillages (ou injection d'eau, waterflooding).

En effet, lors d'un remouillage 1-2-3 (Figure 4-5), avant que LC soit touché (1-2), on produit de faibles gonflements de nature élastique, alors qu'une fois LC touché (2-3), on a des effondrements de nature plastique.

Le modèle considère aussi un couplage entre SI et LC. Il suppose qu'une remontée de SI déplacera LC, mais pas réciproquement (Figure 4-6) . Ceci permet de décrire l'effet de la succion sur l'augmentation de la résistance mécanique des sols et des craies dont la teneur en eau diminue et qui est observée expérimentalement (voir plus loin).

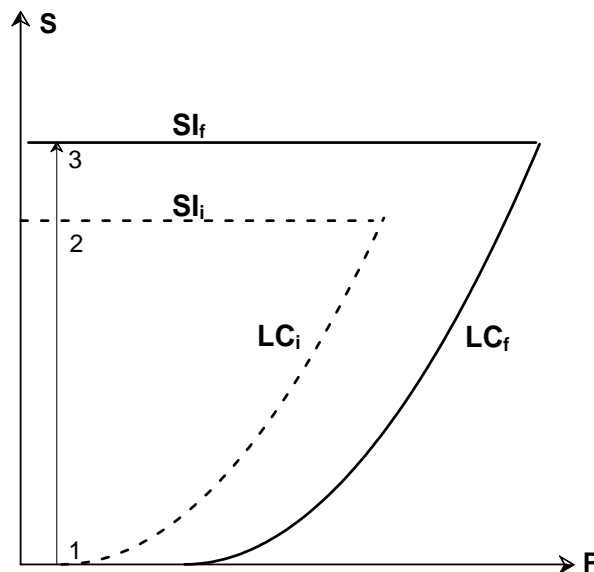


Figure 4-6 : Couplage entre SI et LC

4.4.3 Le modèle Pasachalk

Le modèle Pasachalk (Collin et al., 2000; Collin, 2000; Pasachalk, 2001), doit reproduire les deux principaux mécanismes de rupture observés, l'un par effondrement poreux ("pore collapse"), l'autre par cisaillement (rupture "fragile"). Il doit en outre tenir compte d'un troisième mécanisme, la rupture en traction et de l'influence de la succion.

La description complète du modèle est donnée dans les publications en référence et dans la publication en annexe (Schroeder et al., 2000) qui présente les résultats obtenus au cours du projet EU Pasachalk (1997-2000).

1er mécanisme : rupture par "pore collapse"

En résumé, le modèle Pasachalk est issu du modèle Cam-Clay classique qui a été modifié en introduisant une dépendance du troisième invariant du déviateur des contraintes et de l'angle de Lode, par l'intermédiaire d'un paramètre, m .

De la sorte, la forme de la surface dans le plan déviatorique n'est pas un cercle.

$$f = II_{\hat{\sigma}}^2 + m^2 \left(I_{\sigma} - \frac{3c}{\tan \phi_c} \right) (I_{\sigma} + 3p_0) = 0$$

Le coefficient m est défini par:

$$m = a(1 + b \sin 3\theta)^n$$

θ étant l'angle de Lode dérivé de l'équation du troisième invariant:

$$\theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{III_{\hat{\sigma}}}{II_{\hat{\sigma}}^3} \right) \quad \text{avec} \quad III_{\hat{\sigma}} = \frac{1}{3} \hat{\sigma}_{ij} \hat{\sigma}_{jk} \hat{\sigma}_{ki}$$

a , b et n devant vérifier certaines conditions (Van Eekelen, 1980)

Une loi de plasticité associée est actuellement utilisée pour le potentiel plastique. Une loi non -associée sera implémentée lorsque les résultats expérimentaux auront fourni plus d'informations.

2ème mécanisme : modèle à frottement interne : PLASOL

Ce modèle (Barnichon, 1998) est construit à partir du cône de Drucker - Prager en introduisant une dépendance de l'angle de Lode, θ , pour se rapprocher du critère de Mohr - Coulomb. Il consiste en un lissage de la surface de plasticité de Mohr - Coulomb.

La formulation proposée par Van Eekelen (op.cit.) est adoptée et le modèle peut être écrit d'une manière très semblable au critère de Drucker - Prager:

$$f = II_{\hat{\sigma}} + m \left(I_{\sigma} - \frac{3c}{\tan \phi_c} \right) = 0$$

où le coefficient m est le même que plus haut.

3ème mécanisme : traction

Une troisième surface de charge est introduite. Elle consiste à limiter la contrainte moyenne en traction, indépendamment du déviateur.

Dans le plan $(I_{\sigma}, II_{\hat{\sigma}})$, la surface de charge est donnée par :

$$f = I_{\sigma} - 3\sigma_t = 0$$

Cette surface utilise la plasticité associée, sans écrouissage.

prise en compte de la succion

La surface de charge dans le plan $(I_\sigma, II_{\hat{\sigma}})$ est influencée par la succion mais son introduction dans l'expression de cette surface n'est pas suffisante pour reproduire le comportement observé expérimentalement.

De nouvelles surfaces sont nécessaires de manière à être décrites non seulement dans le plan $(I_\sigma, II_{\hat{\sigma}})$ mais aussi dans l'espace $(I_\sigma, II_{\hat{\sigma}}, s)$ (Alonso, Gens & Josa 1990), (Li, 1999).

La succion influence principalement:

- la pression de préconsolidation p_0 qui varie en fonction de la succion en suivant l'expression de la courbe LC introduite par le modèle de Barcelone:

$$p_0 = p_c \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}}$$

$$\text{avec } \lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s)]$$

où p_0^* est la pression de préconsolidation pour $s = 0$, p_c est une pression de référence, κ et λ les pentes élastique et plastique dans le plan oedométrique;

- la cohésion qui augmente avec la succion suivant la relation :

$$c(s) = c(0) + k s$$

L'angle de frottement interne et la résistance en traction sont supposés ne pas être influencés par la succion.

La troisième surface de charge a donc les formulations suivantes, fonctions de la succion:

$$\text{Modèle Cam-Clay: } f = II_{\hat{\sigma}}^2 + m^2 \left(I_\sigma - \frac{3c(s)}{\tan \phi_C} \right) (I_\sigma + 3p_0(s)) = 0$$

$$\text{Modèle PLASOL: } f = II_{\hat{\sigma}} + m \left(I_\sigma - \frac{3c(s)}{\tan \phi_C} \right) = 0$$

$$\text{Modèle Traction: } f = I_\sigma - 3\sigma_t = 0$$

Avec ces surfaces, aucune déformation irréversible ne sera produite par un accroissement de la succion. Un quatrième critère est nécessaire. Il est obtenu par la courbe SI:

$$s - s_0 = 0$$

La représentation graphique du modèle Pasachalk dans l'espace p' (ou I_σ), q (ou II_σ), S (contrainte effective moyenne, contrainte déviatorique, succion) est donnée ci-dessous (Figure 4-7).

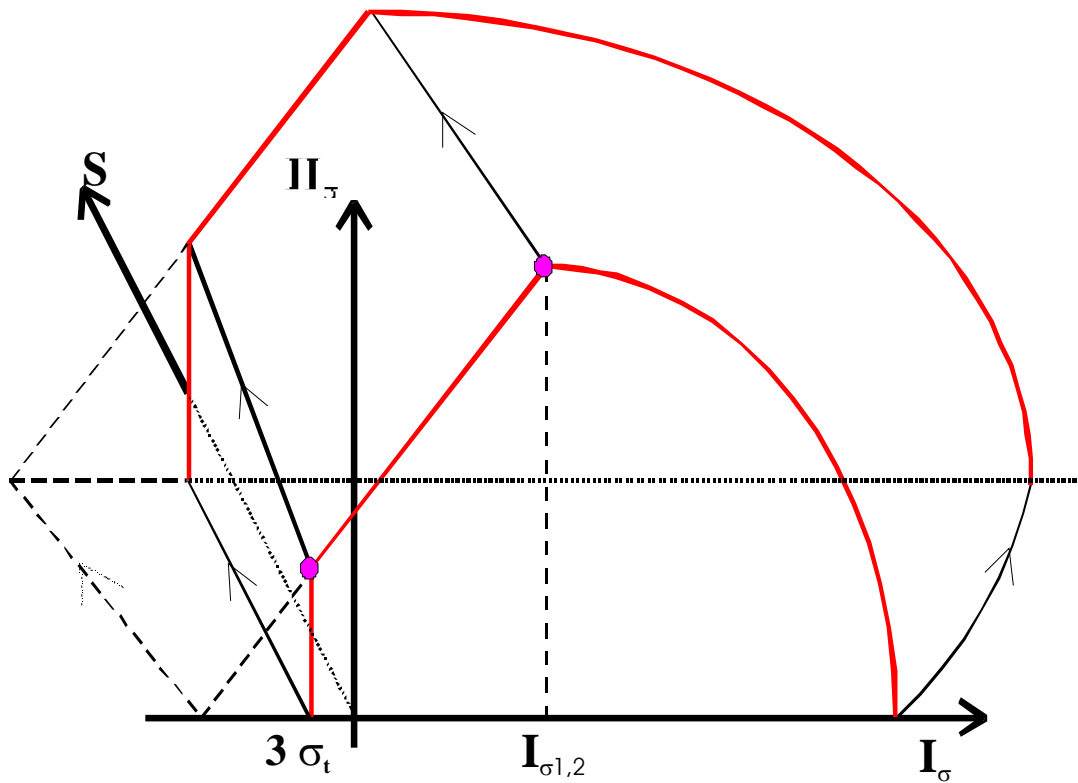


Figure 4-7 Le modèle Pasachalk

Les phénomènes et résultats expérimentaux présentés par la suite peuvent tous se replacer dans le modèle Pasachalk, à l'exclusion du fluage dont la modélisation est en cours (Projet EU Pasachalk 2).

4.5 Détermination expérimentale des surfaces de plasticité

Les paramètres généraux de loi de comportement Pasachalk, paramètres de rupture et d'écroissage à l'exclusion des paramètres relatifs à la succion dont il sera question plus loin, ont été déterminés par un ensemble d'essais réalisés sur des craies de Lixhe, complètement saturées en eau ou complètement saturées en Soltrol.

Les essais ont été réalisés avec des chemins de contrainte très variés : chemins monotones avec augmentation des contraintes jusqu'à la ou les ruptures, cycles de chargement / déchargement au cours de ces chemins, chargement au delà du "pore collapse", avec écroissage puis retour à niveau inférieur de contrainte et rechargement suivant un autre chemin etc....

Les points représentés ont été déterminés à partir des diagrammes "contrainte - déformation" expérimentaux. Si dans le cas de la rupture "fragile", le point de rupture est assez précis, il a été vu au § 4.3. que la détermination du "pore collapse" était assez délicate sur les diagrammes "contrainte-déformation" par rapport à celles faites sur les diagrammes "contrainte - contrainte".

Les résultats de 45 tests (20 échantillons saturés à l'eau et 25 saturés au Soltrol sont présentés aux diagrammes p' / q (Figure 4-8 et Figure 4-9) qui donnent les chemins de contraintes suivis et les positions des ruptures des différents types ("pore collapse", cisaillement (fragile) ou mixte) ainsi que les formes des surfaces de charge, initiale et à divers niveaux d'écroissage.

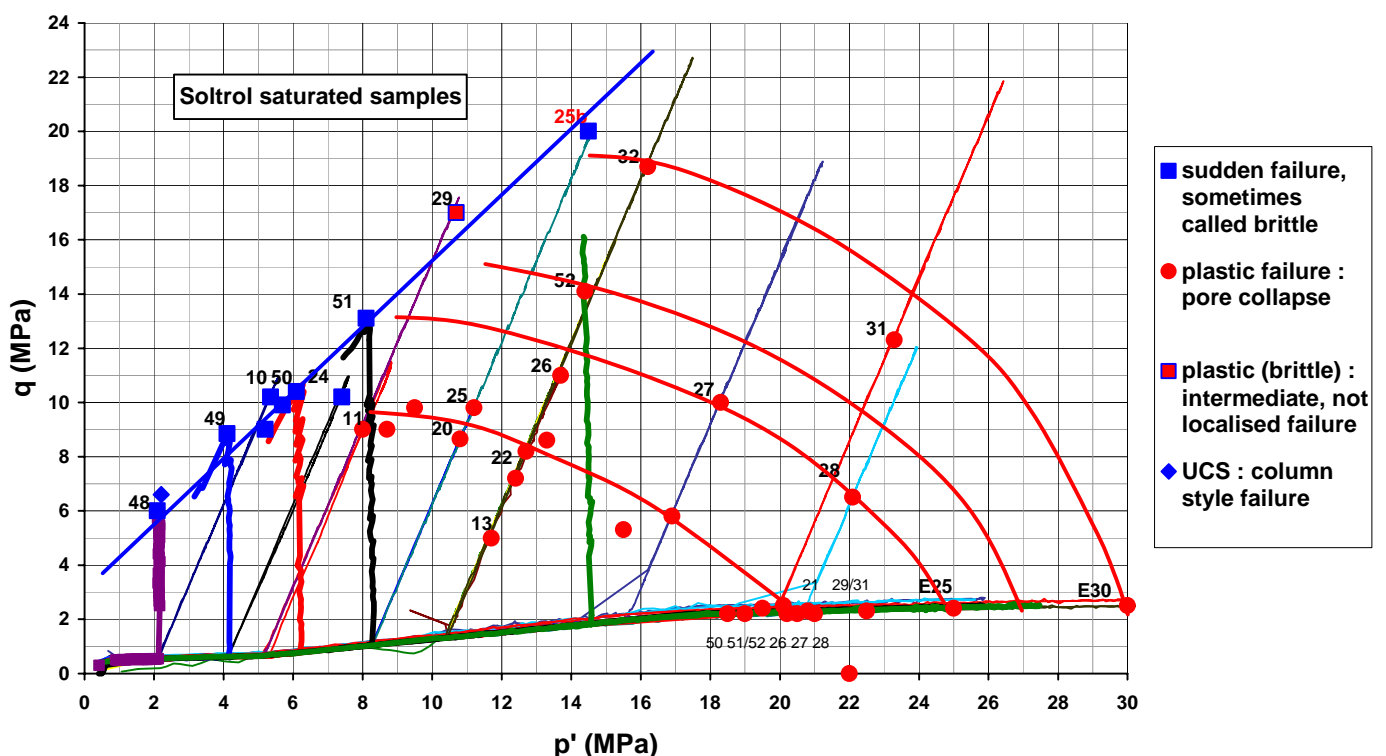


Figure 4-8 : Chemins de contraintes -ruptures - surfaces de charges
Echantillons saturés en huile (Soltrol)

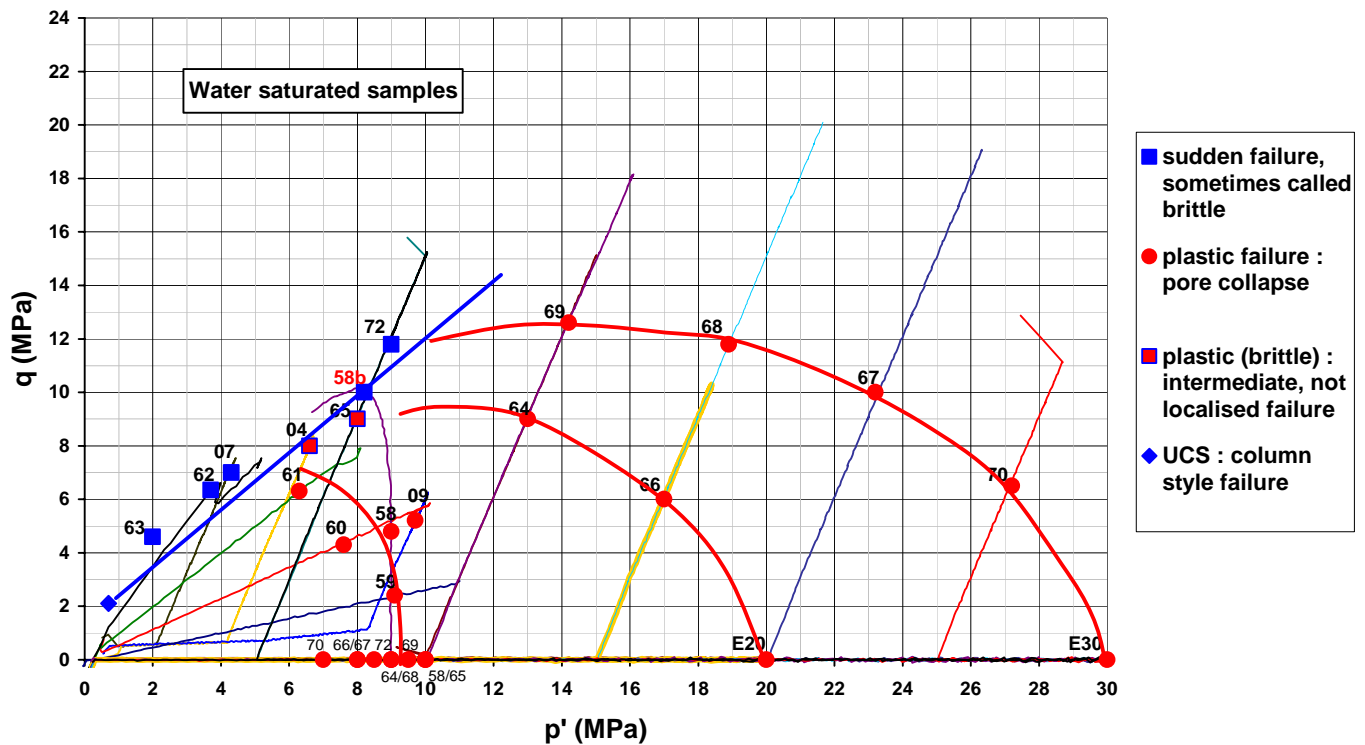


Figure 4-9: Chemins de contraintes -ruptures - surfaces de charges
Echantillons saturés en eau

Les principales conclusions qu'on peut tirer de ces essais sont :

- il n'y a pas d'influence du chemin de contraintes sur les valeurs des ruptures (quel que soit le type de rupture);
- un écrouissage plastique se produit clairement pour le comportement volumique;
- les formes des surfaces de charges volumiques sont différentes dans le cas de saturation à l'eau et dans le cas de saturation à l'huile. Les règles d'érouissage doivent donc prendre les changements de fluides en considération;
- il n'y a pas de changement de la surface de charge par frottement interne (rupture fragile) après écrouissage;
- après écrouissage, durant le rechargement, un échantillon peut repasser en plasticité et, si le chargement est poursuivi, durant l'érouissage, il peut atteindre la surface de charge de la rupture par frottement interne. C'est le cas pour l'échantillon #58 saturé à l'eau et pour l'échantillon #25 saturé en Soltrol.

4.6 Influence de la porosité et de la teneur en silice

Parmi les différentes caractéristiques propres de la craie, la porosité et la teneur en silice³⁵ sont les facteurs principaux qui conditionnent son comportement mécanique.

On trouve des études de l'influence de la porosité sur la résistance des craies et micrites (calcaires à cristaux de dimensions de l'ordre de quelques μm) dès le début les années 70 (Carniglia, 1973, Doremus 1978).

Les recherches effectuées dans le cadre du JCRI³⁶ ont, dès 1983, mis en évidence le rôle de la porosité dans le comportement mécanique de la craie. C'est ainsi que le comportement des craies d'Ekofisk a été "normalisé" et que les calculs de la subsidence se basaient sur des courbes standard (Figure 4-10). Ces courbes ont été pour la plupart obtenues par extrapolation mais elles pouvaient, faute de mieux, servir de base aux premiers calculs.

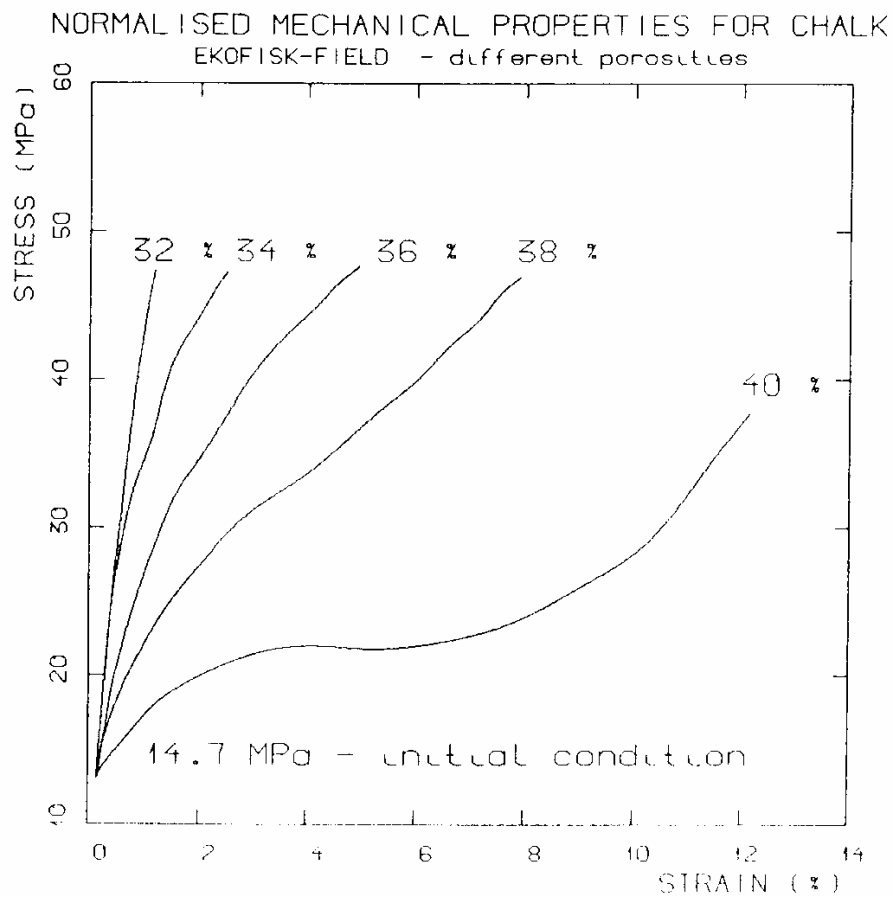


Figure 4-10 : Courbes contrainte - déformation normalisées - craies d'Ekofisk (document PPCoN, in Jones & Leddra, 1989)

³⁵ de même, bien entendu, que la teneur en argiles mais l'étude des craies argileuses et des marnes sort du cadre de ce mémoire.

³⁶ JCRI : Joint Chalk Research I (1983-1985)

L'effet simultané de la porosité et de la teneur en silice a été mis en évidence aux LGIH, au cours du JCRI par une série d'essais triaxiaux réalisés sur des craies de Mer du Nord provenant du gisement d'Ekofisk appartenant au Danien (formation Ekofisk) et au Maastrichtien (formation Tor).

La publication en annexe (Monjoie, Schroeder et al., 1985b) donne la totalité des résultats. Ceux-ci peuvent être résumés par le diagramme ci-dessous (Figure 4-11) qui donne l'ensemble des cercles de Mohr obtenus sur échantillons secs.

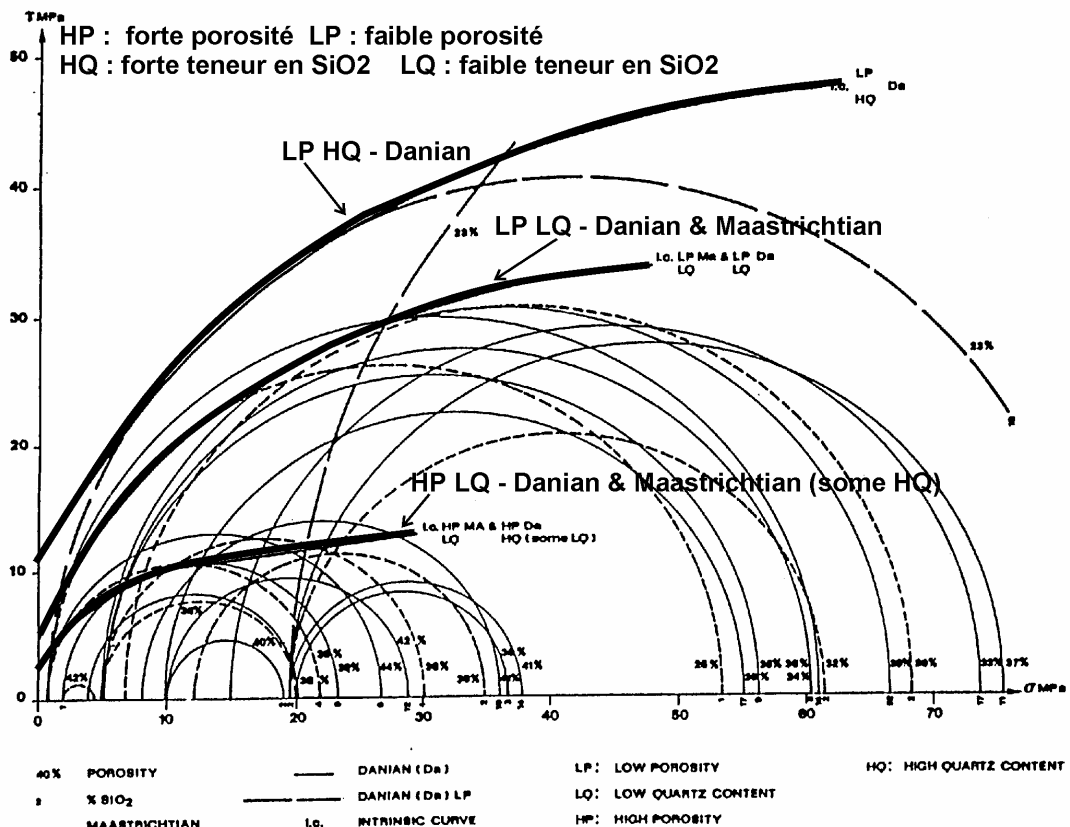


Figure 4-11 : Cercles de Mohr de craies de Mer du Nord - Influence de la porosité et de la teneur en SiO₂ (Danien et Maastrichtien) (Monjoie, Schroeder et al., 1985b)

On distingue trois courbes intrinsèques :

- les craies à forte porosité (> 37%) et faible teneur en quartz (<10%), de la formation Tor et de la formation Ekofisk (avec parfois, pour cette dernière, une teneur en quartz plus élevée, en raison de son hétérogénéité). Les résistances sont les plus faibles
- les craies à faible porosité (< 37%) et faible teneur en quartz des deux formations, de résistances nettement plus élevées
- les craies à faible porosité et forte teneur en quartz, uniquement de la formation Ekofisk, de résistance un peu supérieure aux craies précédentes.

Il apparaît donc que l'influence de la silice est sans doute moins prépondérante que celle de la porosité.

Une série d'essais uniaxiaux (oedométriques) réalisés dans des conditions de réservoir³⁷, dans le cadre du JCRII (Monjoie, Schroeder et al., 1990, publication en annexe) a permis de préciser ces relations. Ces essais avaient aussi pour objet d'étudier le fluage de la craie (qui fera l'objet du § 4.9).

La figure ci-après (Figure 4-12) donne l'ensemble des courbes contraintes - déformations obtenues.

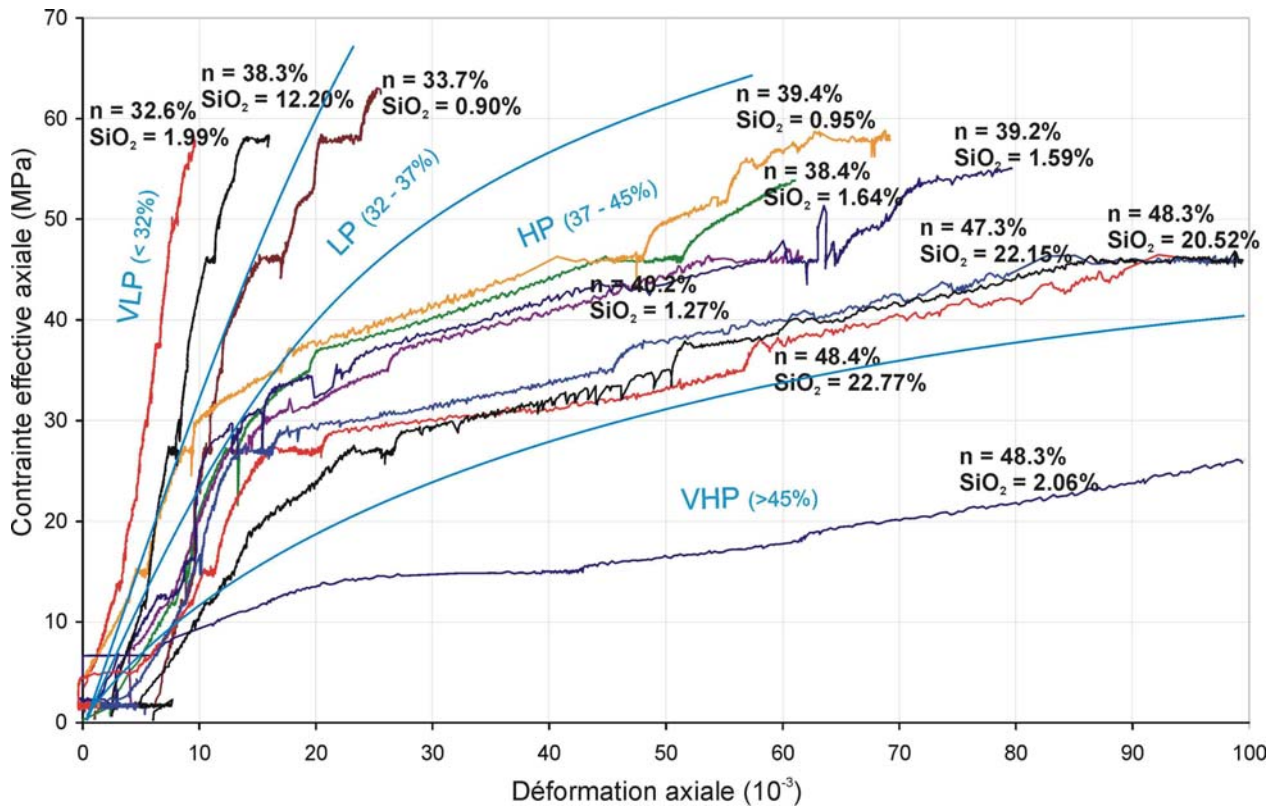


Figure 4-12 : Essais oedométriques sur craies de Mer du Nord de diverses porosités et teneurs en silice. Répartition en classes de porosités (Monjoie, Schroeder et al., 1990)

Quelle que soit la porosité et la teneur en SiO₂, la forme de la courbe contrainte - déformation est similaire.

Avant l'entrée en plasticité, la pente de la partie "élastique" est influencée par la porosité. Ceci se traduit par une modification du module oedométrique mesuré durant la phase "déplétion".

³⁷ L'échantillon est d'abord amené dans les conditions de contraintes prévalant au début de l'exploitation (en 1970), c'est-à-dire contrainte totale verticale, σ_1 , de 60 MPa, contrainte totale horizontale, isotrope, σ_3 , de 55 MPa et pression de pores (pression interstitielle), u , de 48 MPa. Ceci se fait en trois phases : 1 : montée isotrope jusqu'à $\sigma_1 = \sigma_3 = 7$ MPa avec $u = 0$ MPa; 2 : montée isotrope jusqu'à $\sigma_1 = \sigma_3 = 55$ MPa avec $u = \sigma_1 - 7$ MPa; 3 : montée déviatorique jusqu'à $\sigma_1 = 60$ MPa, avec σ_3 maintenu à 55 MPa et u maintenu à 48 MPa. Ensuite, tout en maintenant la contrainte verticale totale constante, la déplétion est simulée en diminuant la pression interstitielle (au taux moyen de 10^{-4} MPa/s) tout en ajustant constamment la contrainte totale horizontale afin d'empêcher toute modification de la déformation latérale (conditions oedométriques).

La variation du module oedométrique en fonction de la porosité est donnée à la Figure 4-13.

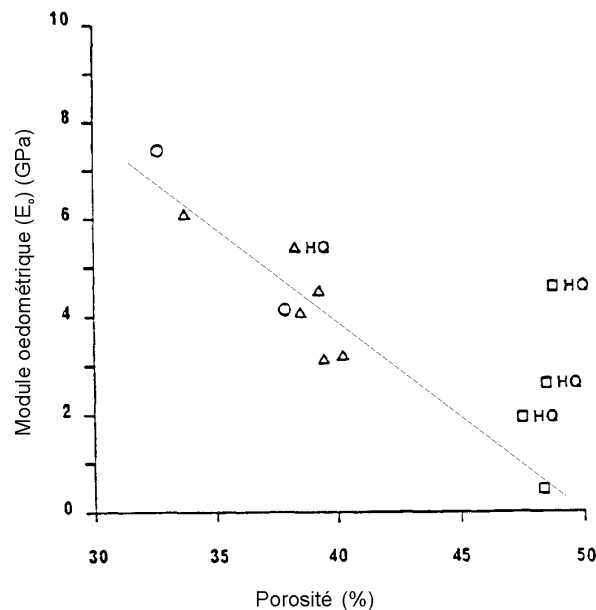


Figure 4-13 : Evolution du module oedométrique de craies de Mer du Nord en fonction de la porosité (d'après Da Siva et al, 1990). Les ronds, triangle et carrés désignent des puits d'échantillonnage; HQ signifie que l'échantillon est à haute teneur en quartz (plus de 12%).

La relation E_o / porosité est à peu près linéaire, si l'on écarte les échantillons à haute teneur en quartz (notés HQ).

Le module "d'élasticité" (ou de "Young"), déterminé par le chargement déviatorique (non visible sur la Figure 4-12) varie aussi avec la porosité. Il est ainsi possible de tracer un diagramme montrant la relation entre le module "d'élasticité" et le module oedométrique (Figure 4-14).

La pente de la relation permet de déduire une valeur du coefficient de Poisson³⁸. Dans ce cas, le rapport $E/E_o = 0.6$ donne un coefficient de Poisson valant 0.36. Cette valeur est à comparer aux autres valeurs du coefficient de Poisson, obtenues autrement :

- les déterminations de K_o (dans la partie pseudo - "élastique") donnent des valeurs de ν allant de 0.18 à 0.42 (en moyenne 0.34)
- les valeurs de ν déduites des rapports entre déformations radiale et axiale mesurées durant la phase déviatorique lors de la mise de l'échantillon dans les conditions de réservoir sont très dispersées et varient de 0.05 à 0.20.

³⁸ par la relation
$$E = E_o \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

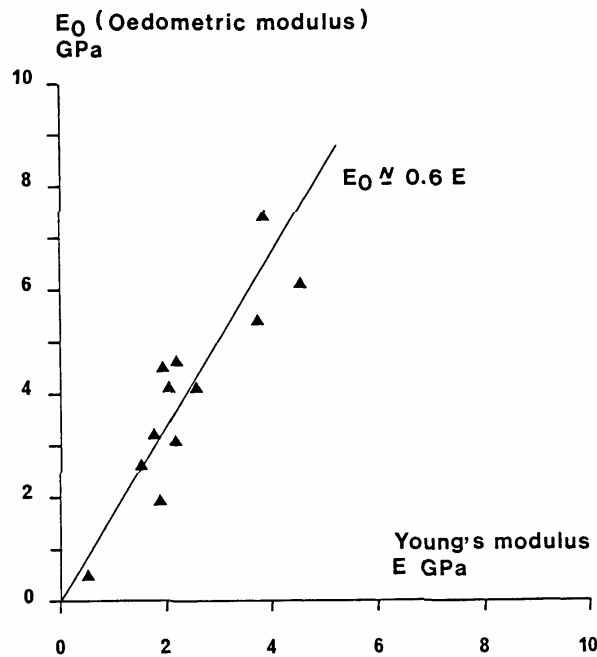


Figure 4-14: Relation module oedométrique - module "d'élasticité" (d'après Da Silva et al., 1990)

Les courbes de la figure 5-12 sont en nombre insuffisant pour permettre de déduire une loi générale, fonction de la porosité et de la teneur en silice, sur le comportement à la rupture (valeur du "pore collapse") et sur la phase plastique.

Néanmoins, il est possible de distinguer 4 différentes catégories de comportement en fonction de la porosité:

- craies à très basses porosité (moins de 32%) qui ne montrent pas de "pore collapse" jusqu'au niveau de contraintes atteint (60 MPa)
- craies à basse porosité (32 à 37 %) pour lesquelles le "pore collapse" est atteint entre 30 et 35 MPa
- craies à haute porosité (37 à 45 %) pour lesquelles le "pore collapse" est atteint entre 25 et 30 MPa
- craies à très haute porosité (plus de 45 %) pour lesquelles le "pore collapse" est atteint avant 20 MPa.

L'influence d'une forte teneur en quartz (c'est-à-dire environ plus de 10%), est de faire passer l'échantillon à la catégorie de porosité inférieure.

Les résultats des "Joint Chalk Research" de 1985 à 1992 ont permis de constituer une base de données rassemblant les essais réalisés par tous les participants. Cette base de données a été analysée pour déterminer les relations entre certains paramètres mécaniques et la porosité des craies de champs pétroliers de Mer du Nord en zone danoise (Engstrøm, 1992).

Les principales corrélations obtenues sont les suivantes.

- pour le module de Young, la relation est assez satisfaisante, sans trop de dispersion (Figure 4-15) :

$$E = 224800 * \text{Exp}(-11.2 * n) \text{ (MPa)}$$

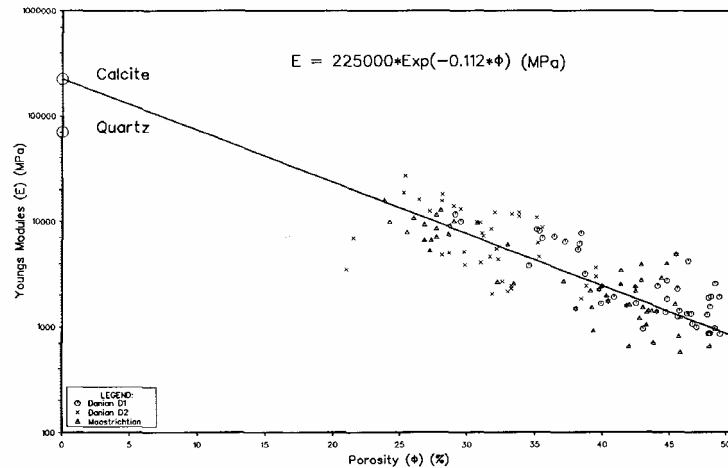


Figure 4-15 : Module de Young en fonction de la porosité craies danoises - champs Tyra et Dan - (Engstrøm, 1972)

- pour le coefficient de Poisson, la dispersion est plus forte (Figure 4-16) :

$$\nu = 0.117 + 0.21 * n$$

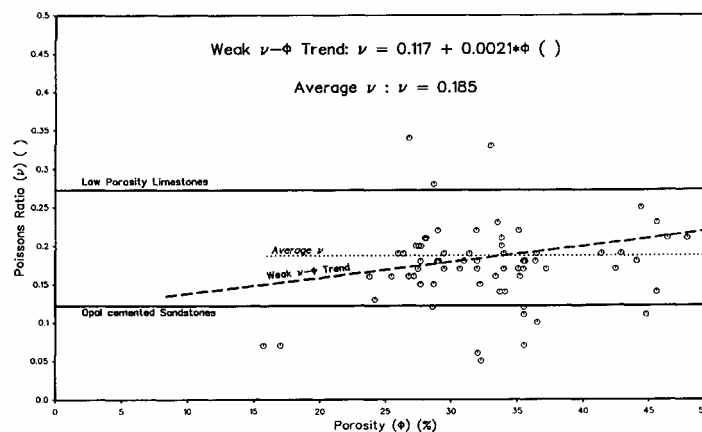


Figure 4-16 : Coefficient de Poisson en fonction de la porosité craies danoises - champs Tyra et Dan - (Engstrøm, 1972)

- la base de données contenait quelques informations sur le coefficient de Biot³⁹, α . Comme les essais de détermination de ce coefficient sont rares, il est intéressant de montrer leurs résultats (Figure 4-17), même si la corrélation avec la porosité est à prendre avec circonspection.

³⁹ Le coefficient de Biot est en général défini comme : $\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_g}$, K_b étant la compressibilité de la roche et K_g la compressibilité des grains (de la calcite dans le cas de la craie)

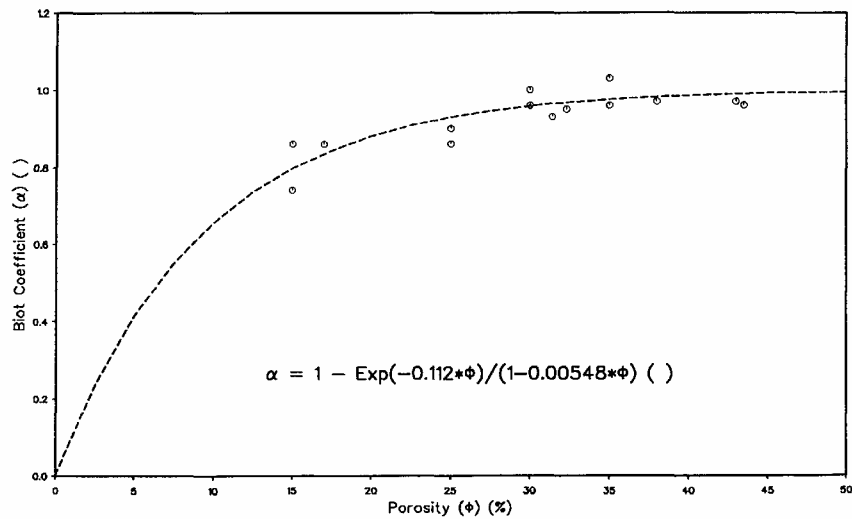


Figure 4-17: Coefficient de Biot en fonction de la porosité tous types de craies (Engstrøm, 1972)

- en ce qui concerne le "pore collapse" (Figure 4-18), la dispersion est trop importante pour pouvoir tirer des corrélations valables.

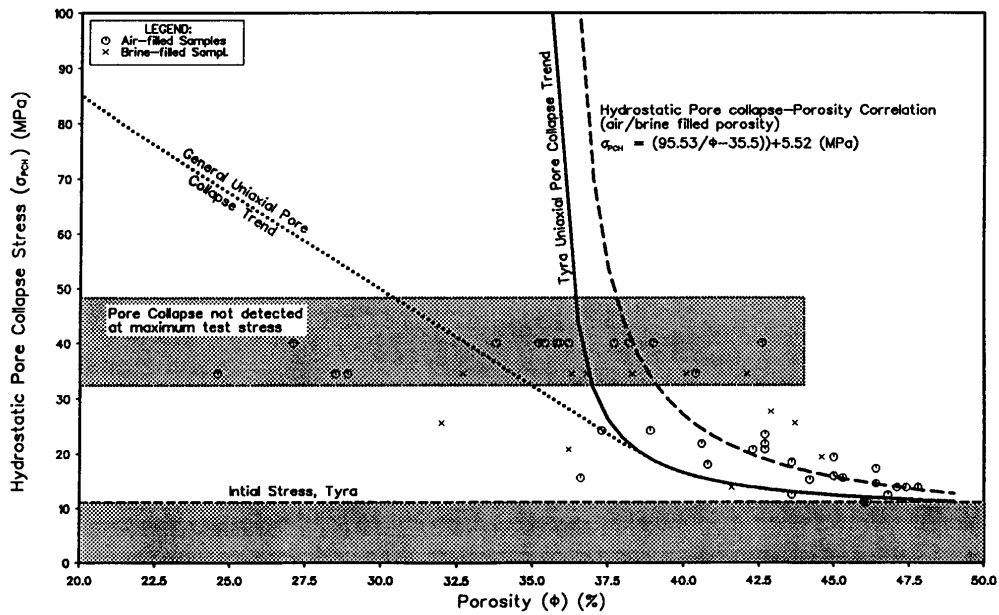


Figure 4-18 : "pore collapse" au cours d'essais de compression isotrope en fonction de la porosité craies danoises - champs Tyra et Dan (Engstrøm, 1972)

Apparemment, le "pore collapse" est plus sensible à l'influence des autres facteurs (teneur en silice, degré de saturation, vitesse de mise en charge, etc.) que les paramètres élastiques, module de Young et coefficient de Poisson.

4.7 Interaction fluide - squelette : quantification de l'influence des fluides interstitiels

L'effet de l'eau sur le comportement des craies est connu depuis longtemps et la diminution de la résistance lors de la saturation fait d'ailleurs partie du système de classification utilisé par le LCPC à la fin des années 60 (Masson, 1973)

Les effets des autres fluides étaient aussi déjà perçus dans les années 70, surtout en ce qui concerne les propriétés de gonflement. Lorsqu'on les sature en eau, les craies présentent un faible gonflement (Doremus, 1978), gonflement instantané de l'ordre de $50 \cdot 10^{-6}$, se stabilisant au bout d'une heure à des valeurs 2 à 20 fois plus élevées selon le type de craie. Le même phénomène de gonflement s'observe avec d'autres fluides mais l'amplitude est moindre lors d'utilisation d'alcools (méthanol à heptanol) et encore moindre pour un hydrocarbure (benzène)⁴⁰.

L'étude systématique des influences des fluides sur le comportement mécanique des craies a débuté avec les programmes "Joint Chalk Research". Elle s'est accélérée lorsque les problèmes de subsidence additionnelles dues au "waterflooding" se sont révélés plus importants que prévu.

4.7.1 Essais avec fluides et viscosités divers

Les premiers essais réalisés sur des craies d'affleurement (craie de Lixhe) saturées en différents fluides ont mis en évidence une forte relation entre la nature du fluide et la résistance de la craie.

Le diagramme $p' - q$ (Figure 4-19) donne les contraintes de rupture (par "pore collapse" ou cisaillement) des échantillons testés (Monjoie, Schroeder et al., 1985b). Tous les essais étaient de type triaxial "drainé". Une série d'échantillons ont été testés secs. Pour les autres, les fluides utilisés étaient :

- de l'eau en équilibre chimique avec la craie (obtenue par macération de poudre de craie dans de l'eau distillée)
- de l'eau de mer reconstituée (composition données en annexe)
- du méthanol
- du dodécane (viscosité 1.35 cp)
- de l'huile de Mer du Nord (viscosité 6.9 cp)
- de la paraffine liquide (viscosité 120 cp)

Les surfaces de charge tracées en pointillé (la forte dispersion ne permettant pas de les déterminer avec plus de précision) montrent de nettes différences de comportement : les craies "sèches" sont les plus résistantes, suivies de peu par les craies saturées par la paraffine à forte viscosité (120 cp). Les échantillons

⁴⁰ Ces phénomènes sont en partie explicables par la disparition des forces capillaires (voir §2.5.1.) lors du mouillage de la craie mais les craies étudiées par Doremus étant en partie atypiques, l'influence des argiles et d'une induration complique l'interprétation.

saturés en huile à 6.9 cp et dodécane à 1.35 cp sont plus résistants que ceux saturés en méthanol, les échantillons saturés en eau (de mer ou en équilibre chimique) étant les moins résistants.

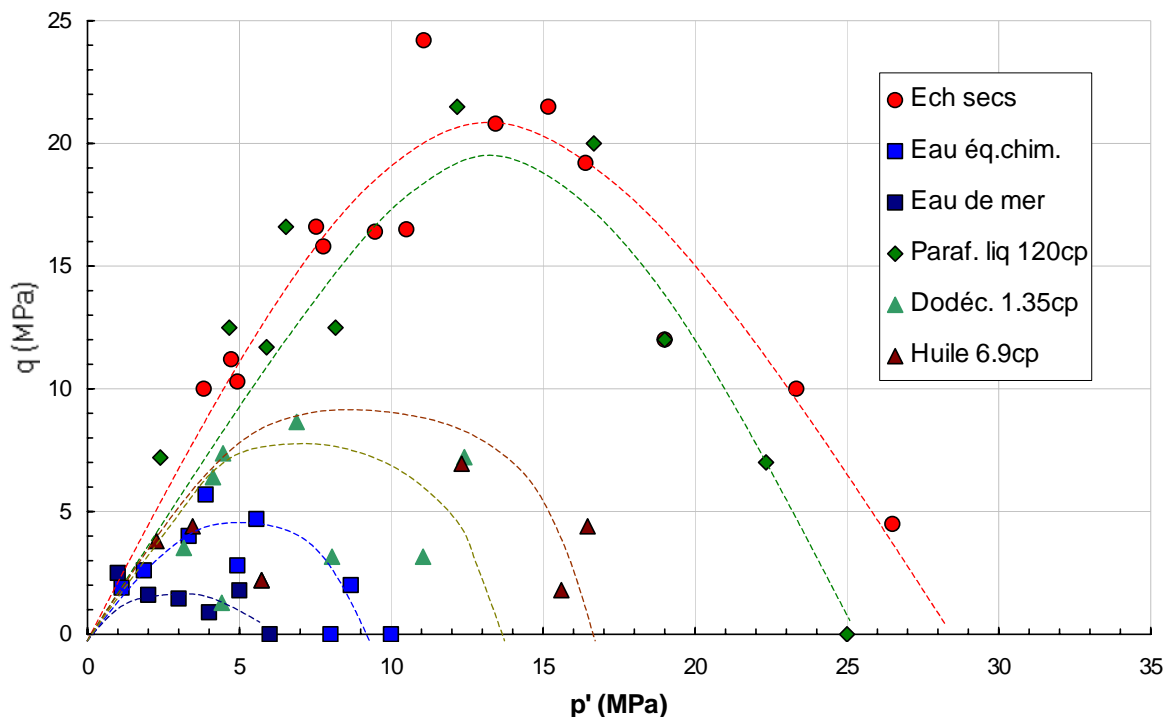


Figure 4-19: Points représentatifs des états de contrainte au moment de la rupture pour des échantillons de craie de Lixhe, saturés en différents fluides, soumis à des essais triaxiaux.

A partir de ces observations, on pouvait supposer que la viscosité du fluide saturant était un facteur de résistance, la paraffine liquide (120 cp) donnant les valeurs les plus élevées après les craies sèches et les eaux (1 cp) donnant les valeurs les plus faibles.

Cependant, la viscosité n'explique évidemment pas la résistance élevée des craies sèches et n'explique pas non plus la résistance plus élevée des échantillons saturés en méthanol, moins visqueux que l'eau⁴¹.

Pour vérifier l'influence possible de la viscosité, une série d'essais triaxiaux⁴² a été réalisée sur des craies de Lixhe saturées en fluides de viscosités variables : outre les eaux utilisées précédemment et la paraffine liquide à 120 cp, on a aussi employé

- du Soltrol (viscosité environ 3 cp);
- de la paraffine liquide à 100 cp;

⁴¹ le cas du méthanol sera traité aux § 5.9.1. et 5.10.

⁴² chemin de contraintes : montée isotrope jusqu'à 20 MPa, essai triaxial avec 20 MPa de confinement et augmentation du déviateur jusqu'à $\sigma_1 = 30$ MPa; fluage sous contrainte constante $\sigma_1 = 30$ MPa et $\sigma_3 = 20$ MPa. Essais drainés, mise en charge à 10^{-3} MPa/s.

- un mélange de Soltrol et paraffine liquide de viscosité 20 cp.

Les résultats de la phase isotrope de l'essai sont donnés à sous forme d'un diagramme contrainte - déformation axiale (Figure 4-20).

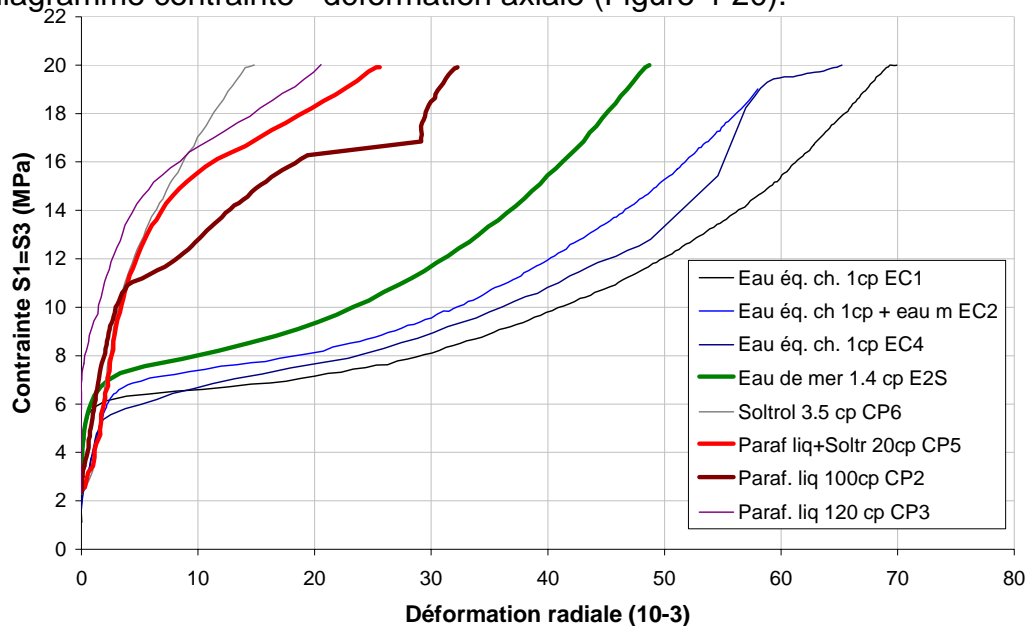


Figure 4-20: Diagramme contrainte - déformation - phase isotrope des essais triaxiaux sur craies de Lixhe saturées en différents fluides

Une transition progressive en fonction de la viscosité n'apparaît pas. Par contre, on distingue nettement deux familles de comportements les craies "à l'eau", avec un "pore collapse" vers 7-8 MPa et les craies "à l'huile" avec un "pore collapse" vers 15 MPa, les différences à l'intérieur d'un même famille relevant vraisemblablement de la dispersion.

En fait, les fortes résistances obtenues précédemment pour les craies saturées en paraffine liquide étaient dues à un artefact expérimental qui surestimait les résistances⁴³

La constatation de la séparation en deux types de comportements, similaire aux comportements de limons insaturés et saturés est à l'origine de l'approche "insaturée" qui conduira au modèle Pasachalk (Delage, Schroeder & Cui, 1996, publication en annexe).

Il faut noter la déformation importante des craies "à l'eau" qui conduit à un écrouissage conférant à ces échantillons, au cours de la phase triaxiale, une rigidité plus élevée que celle des échantillons "à l'huile, moins déformés.

Ceci est bien visible sur les diagrammes contrainte - déformation de la phase déviatorique de l'essai (Figure 4-21). Les pentes des courbes des échantillons "à l'eau" sont toutes plus élevées que celles des échantillons à l'huile.

⁴³ les grandes vitesses de chargement, (pouvant aller jusqu'à 10^{-2} MPa/s, voire même plus) dues aux matériels utilisés à l'époque ne permettaient pas un drainage total dans le cas de fluides très visqueux, ce qui entraînait des pressions interstitielles non nulles, non prises en compte lors de l'interprétation. L'utilisation de vitesses de mise en charge plus lentes (maximum 10^{-2} MPa/s) et de fluides de viscosités inférieures à 10 cp évite ces inconvénients. Le calcul de la surpression interstitielle causée par la mise en charge figure en annexe.

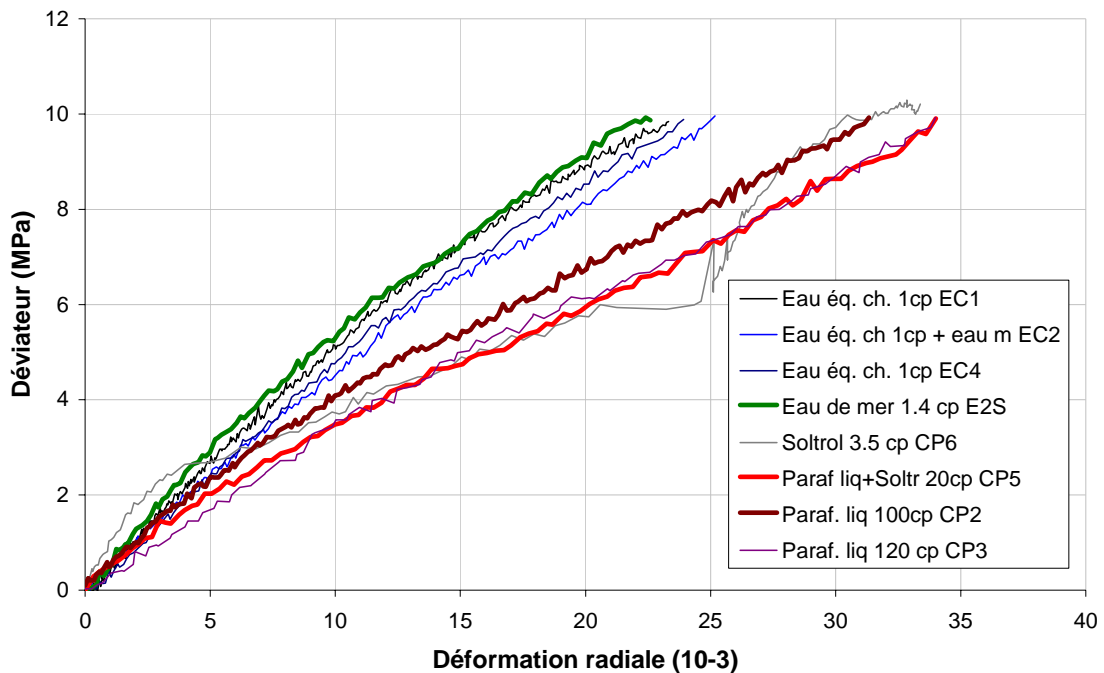


Figure 4-21: Diagramme contrainte - déformation - phase déviatorique des essais triaxiaux sur craies de Lixhe saturées en différents fluides (en rouges - bruns, les craies "à l'huile", en verts - bleus, les craies "à l'eau")

4.7.2 Cas particuliers de la craie sèche et de la craie saturée en méthanol.

La présence d'eau dans la craie a été discutée au §2.5. La résistance plus élevée de la craie sèche peut s'expliquer par le fait que la craie sèche contient encore une petite quantité d'eau donnant lieu à des ménisques de petite taille, donc impliquant de fortes succions.

Une première étude de l'influence du séchage a été faite sur de la craie de Venteuil (Dessenne, 1971), à 40% de porosité. La résistance en compression simple de la craie séchée à 50°C est de 9 MPa, la résistance passant à 12 MPa pour un séchage à 100°C, et à 15 MPa pour un séchage à 150°C

Une confirmation expérimentale du rôle de cette eau résiduelle a été faite au Stavanger College (Madland, 1999). Des essais de traction (essais brésiliens) ont été réalisés sur des éprouvettes de craie de Lixhe séchées à des températures entre 120°C, et 400°C. Les contraintes de rupture en traction, données ci-dessous (Tableau 4-3), montrent clairement l'influence du séchage, la résistance après séchage à 400°C étant près de l'ordre de 1.5 à 2 fois celle après séchage à 120°C.

Tableau 4-3 : contraintes de rupture en traction - craies de Lixhe séchées à différentes températures (d'après Madland, 1999)

Température de séchage	Contrainte de rupture en traction (essai brésilien)
120 °C	de 1.20 MPa à 1.73 MPa
250 °C	de 1.64 MPa à 2.04 MPa
400°C	de 1.81 MPa à 2.42 MPa

En ce qui concerne l'effet du méthanol, ce fluide a souvent été utilisé pour l'étude de la craie (Shao, 1987) en raison de sa neutralité chimique vis-à-vis de la calcite. Tous les essais réalisés montrent (cfr. Figure 4-19) que la craie saturée en méthanol présente un comportement intermédiaire entre le comportement "à l'eau" et le comportement "à l'huile".

Des essais hydrostatiques réalisés sur des craies de Lixhe saturées avec des mélanges eau / méthanol en différentes proportions (Grønås, 1991), montrent une évolution de la contrainte de rupture ("pore collapse") avec la teneur relative méthanol / eau du mélange, comme indiqué ci-dessous (Figure 4-22).

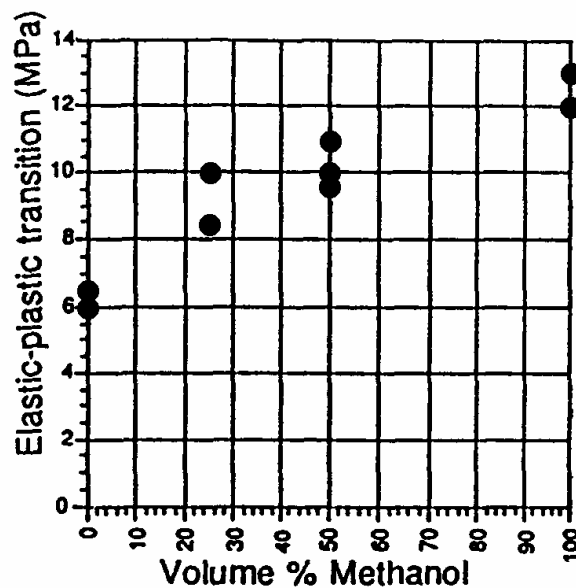


Figure 4-22 : Contrainte de rupture ("pore collapse") de craies de Lixhe saturées par des mélanges eau / méthanol (Grønås, 1991).

L'évolution du "pore collapse", de 6 à 12 MPa est significative, même en tenant compte de la dispersion naturelle des résultats⁴⁴.

Des résultats d'essais de traction sur des craies de Lixhe saturées en différents fluides ont donné les résultats suivants (Risnes et al, 2000). Si la résis-

⁴⁴ la dispersion est réduite du fait que l'ensemble des essais a été réalisé sur des éprouvettes carottées dans le même bloc de craie.

tance de la craie sèche est de 100%, celle de la craie saturée en huile est de 70 - 90 %, celle de la craie saturée en méthanol de 60 - 80 % et celle de la craie saturée en eau de 40 - 60 %.

Ce comportement particulier des craies saturées au méthanol pose des questions sur les mécanismes intervenant dans la succion.

D'une part, le méthanol est miscible à l'eau et donc, lorsqu'on utilise des mélanges eau / méthanol, on ne peut parler de milieu biphasique.

D'autre part, la tension superficielle du méthanol est assez différente de celle de l'eau et lorsqu'il y a mélange, cette tension superficielle évolue. (Tableau 4-4).

Tableau 4-4 : Tension superficielle des mélanges eau - méthanol (d'après Handbook of Chemistry)

Pourcentage de méthanol par rapport à l'eau	Tension superficielle en N/m
0	0.0728
7.5	0.0609
10	0.0590
25	0.0464
20	0.0353
60	0.0330
80	0.0273
90	0.0254
100	0.0227

Le rôle de la tension superficielle du fluide, même saturant, doit donc nécessairement être pris en compte mais il ne suffit pas à lui seul à expliquer les phénomènes. L'effet de surface a été étudié plus en détails (Risnes et al., 2000) par l'approche de la mesure du "potentiel Zeta⁴⁵". Les différents fluides utilisés présentent par rapport à la craie les potentiels zeta présentés au tableau ci-dessous (Tableau 4-5).

⁴⁵ Si par un processus quelconque, on déplace la phase liquide par rapport à la phase solide ou inversement, seule une couche moléculaire directement au contact de la surface s'y maintiendra fermement. Le potentiel du plan qui sépare la ou les couches fixes par rapport à la couche mobile est appelé "potentiel zeta". Il est mesuré par diverses méthodes électrocinétiques (Cuisset, 1980).

Tableau 4-5 : potentiel zeta de craie et fluides usuels (Risnes et al., 2000)

Fluide de saturation	Potentiel zeta (mV)
Eau en équilibre chimique	-20
Méthanol	+10
Huile	0
Eau de gisement ("brine")	-5

Les potentiels zeta des mélanges eau / méthanol ont été mesurés en fonction de la teneur en méthanol du mélange, le potentiel zéro étant atteint vers 60 à 70 % de méthanol (Figure 4-23).

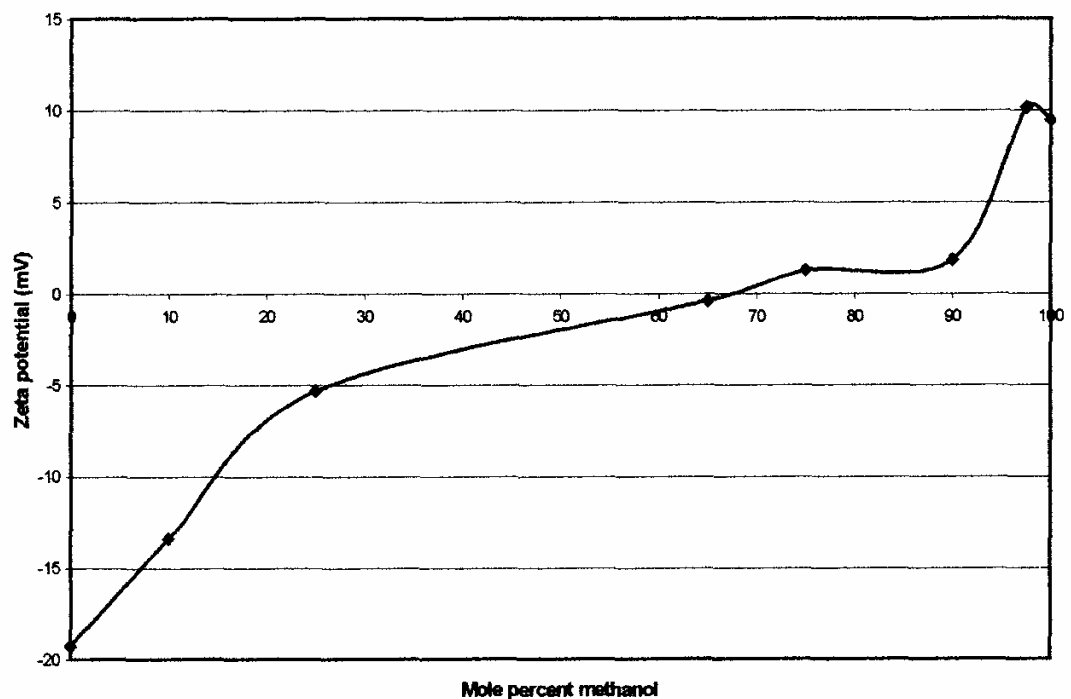


Figure 4-23 : Potentiel zeta fonction de la teneur en méthanol d'un mélange eau / méthanol (Risnes et al., 2000)

L'affaiblissement lors de la saturation en eau n'est pas expliqué directement par le potentiel zeta mais ce concept met en évidence les effets des forces électrostatiques d'origine physico-chimique dans les mécanismes d'interactions fluide - squelette.

4.7.3 Waterflooding

Le passage d'un état "à l'huile" à un état "à l'eau", à contrainte constante, se traduit par une déformation additionnelle, équivalente à l'écart qui sépare les deux familles de courbes.

C'est ce qui se passe dans le gisement pétrolier lors du "waterflooding" qui, comme il a été vu, est utilisé pour maintenir constante la pression du réservoir et améliorer la récupération secondaire du pétrole.

Depuis 1990, différents essais de waterflooding ont été réalisés, (Andersen et al. 1992; Heugas & Charlez, 1990, Charlez et al., 1992; Los et al, 1992; Brignolli et al., 1994; Foged et al, 1996; Foged-Christensen, 1996; Risnes & Kristensen, 1996; Papamichos et al., 1998; Gutierrez et al, 2000).

Aux LGIH, divers essais de waterflooding dans différentes conditions ont été réalisés depuis 1997⁴⁶. La publication en annexe (Schroeder et al., 1998) rend compte, entre autres, de deux de ces essais.

L'originalité de ces essais mérite de les détailler quelque peu.

L'essai a été réalisé sur une craie d'affleurement (craie de Lixhe), saturée en huile (Soltrol) sous vide, placée dans la cellule et lessivée par 2 volumes poreux⁴⁷ de Soltrol pour compléter, éventuellement, la saturation.

L'objectif de l'essai était de mettre en évidence les effets du waterflooding et en particulier de déterminer si la déformation additionnelle se produit exactement au passage du front d'eau, si elle est y localisée et si elle est instantanée.

Dans ce but, 4 jauges de contraintes ont été collées sur l'échantillon de craie, axialement et à différentes distances de la face d'injection, face inférieure de l'échantillon (4, 12, 22 et 30 mm \pm 1mm) (Figure 4-24).

Le collage des jauges a requis une technique particulière pour garantir un bon contact entre les jauges et la craie, sans toutefois rigidifier cette dernière, condition nécessaire pour une mesure correcte des déformations. Cette technique (Djebbi, 1984) est décrite en détails en annexe. Elle comporte une préparation du support, le collage de la jauge puis un recouvrement.

⁴⁶ En fait deux essais complets de waterflooding ont été réalisés aux LGIH dès 1987 (Monjoie, Schroeder et al., 1987) mais ils concernaient des craies de Mer du Nord l'une à moyenne porosité (37%) et très haute teneur en SiO₂ (46.9 %), l'autre à basse porosité (33 %) et forte teneur en SiO₂ (20.8 %). Le waterflooding, pourtant réalisé sous contraintes proches de la rupture pour le premier échantillon, n'a pas mis en évidence de déformation additionnelle, ce qui suggère que la silice joue un rôle non négligeable dans le comportement mécanique des craies atypiques en présence de fluides différents.

⁴⁷ un "volume poreux" signifie un volume de fluide égal au volume des pores de l'échantillon.

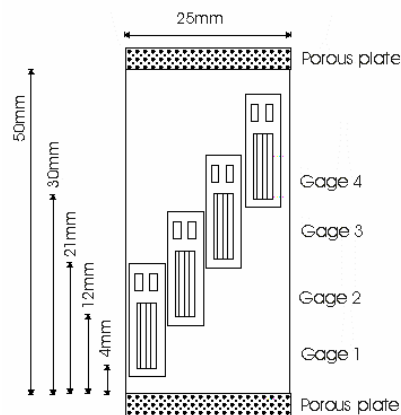


Figure 4-24 : Essai de waterflooding - position des jauges de contrainte

La déformation axiale a aussi été mesurée par un capteur de déplacement (LVDT) axial solidaire du piston de la cellule.

L'échantillon, saturé en huile (Soltrol), a été porté, en conditions drainées, à une contrainte isotrope de 18 MPa. Ce niveau de contraintes se situe juste en dessous du "pore collapse" pour des craies de Lixhe "à l'huile" (qui est de l'ordre de 20 MPa) mais est au dessus du "pore collapse" pour ces craies "à l'eau" (qui est de l'ordre de 12 MPa).

Le waterflooding a ensuite été réalisé (pression d'injection 1 MPa), et les déformations enregistrées. Les résultats ont données sous forme de courbes contraintes déformation (Figure 4-25).

Dans la première partie, pseudo-élastique, qui amène l'échantillon à l'état de contraintes voulu, les déformations mesurées par le LVDT sont en bon accord avec celles mesurées par les jauges de contraintes⁴⁸.

Ensuite, le waterflooding sous contrainte constante produit une déformation additionnelle d'environ 2.5 %, enregistrée aussi bien par le LVDT que par les jauges (tant que ces dernières ne se sont pas décollées du support crayeux, ce qui se produit à environ 3 à 5 % de déformation).

⁴⁸ Ceci est d'ailleurs toujours vérifié, du moins pour les déformations axiales et tant que celle-ci ne dépasse pas 1%, voire moins. On constate en effet très vite un décollage des jauges de leur support. Ce décollage est inévitable, compte tenu de la structure de la craie. C'est pourquoi, pour un tel matériau, il est indispensable de procéder aux mesures de déformations par capteurs de déplacement (LVDT) ou autres en plus (ou à la place) des mesures par jauges de contraintes.

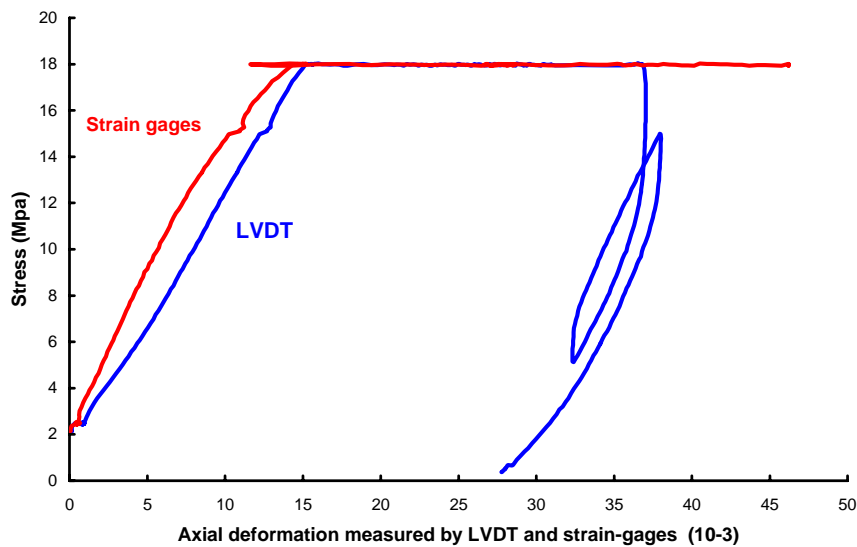


Figure 4-25: Essai de waterflooding - courbes contrainte - déformation

Les déformations enregistrées par chaque jauge de déformations ont dessinées en fonction de la position théorique du front d'injection (Figure 4-26). Cette position théorique est calculée en divisant le volume injecté à un instant donné par la section de l'échantillon, en multipliant par la porosité et en faisant l'hypothèse que 70 % de l'huile est déplacée (valeur généralement admise par les mesures pétrophysiques).

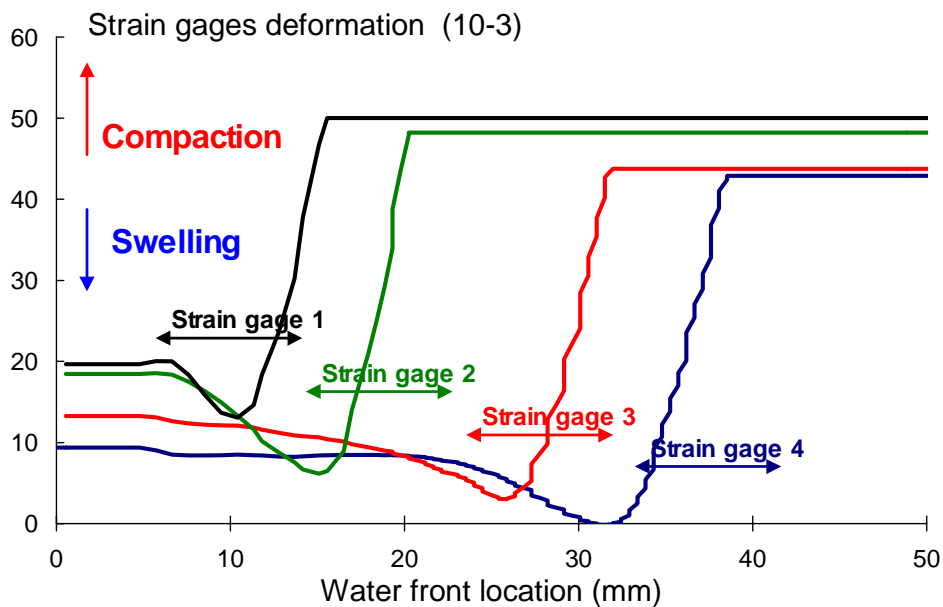


Figure 4-26 : Essai de waterflooding - déformation des jauges de contrainte en fonction de la position théorique du front d'injection - position réelle des jauges.

Sur le diagramme ci-dessus, on constate que les jauges présentent d'abord une très faible compaction, peut-être due à un artéfact expérimental, suivie d'un net gonflement qui pourrait être dû à un surcroît de pression interstitielle provoqué par le passage du fluide puis par une brutale compaction qui se produit pratiquement au droit du front d'injection, ce qui confirme les résultats précédents.

On voit donc que, même si toute l'huile n'est pas remplacée par l'eau et même si le front n'est pas parfaitement plan, le comportement à l'eau survient presque aussitôt que la craie est touchée par le front. A la petite différence près qu'il se produit un décalage entre la position théorique du front et la réaction des jauges, d'autant plus grand que la jauge est éloignée de la section d'injection. Ceci peut provenir d'une imprécision dans le calcul de la position du front mais plus probablement au fait que le déplacement n'est pas parfaitement du type "effet piston" mais qu'il existe certains "chemins préférentiels", ainsi qu'il a été montré plus haut (§ 2.5.6., Figure 2-39 et Monjoie, Schroeder et al., 1985a, en annexe).

Un autre essai de waterflooding, sur craie sèche, a confirmé les résultats obtenus sur la craie saturée en huile (Schroeder et al., 1998 en annexe). Son intérêt principal est de montrer la phase de fluage (sous contrainte constante) qui suit l'injection d'eau (Figure 4-27).

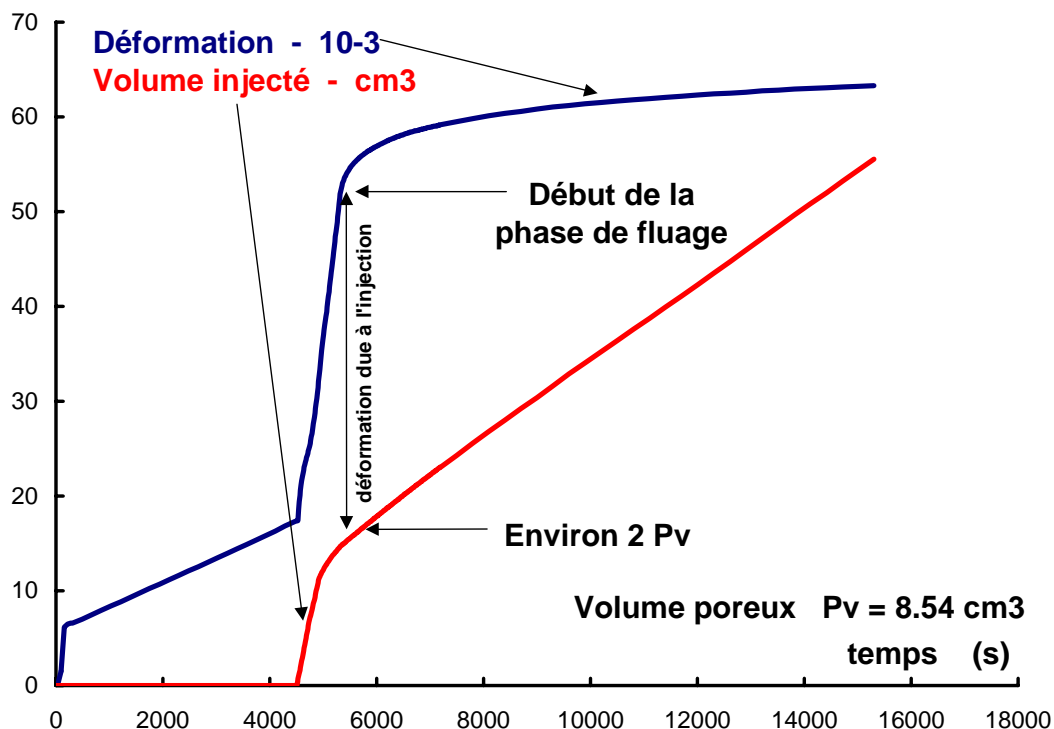


Figure 4-27: Essai de waterflooding d'une craie sèche. Evolution de la déformation et du volume injecté (Schroeder et al., 1998).

On note que la déformation axiale augmente régulièrement, au fur et à mesure de l'avancée du front d'injection tandis que le rythme d'injection de l'eau décroît à mesure que la compaction induite diminue la perméabilité globale de l'échantillon.

A la fin du waterflooding, la déformation ne s'arrête pas après le passage du front mais on constate un fluage non négligeable. Cette constatation a amené certains auteurs (Foged et al, 1996) à attribuer au fluage les compactations additionnelles observées lors du waterflooding. On verra au § 4.11 que cette approche n'est pas à négliger.

Les résultats des essais de waterflooding ci-dessus posent la question de l'éventuelle anisotropie de la déformation en fonction de la direction du flux d'eau par rapport à l'orientation des contraintes principales (Piau et al., 1998).

Pour étudier cette anisotropie, des essais originaux, avec contraintes principales orientées inversées ont été réalisés aux LGIH (Monjoie et al, 2000, Pasachalk, 2001).

Tous les essais sont réalisés en conditions drainées. Le chemin de contrainte comprend les 7 phases suivantes (Figure 4-28):

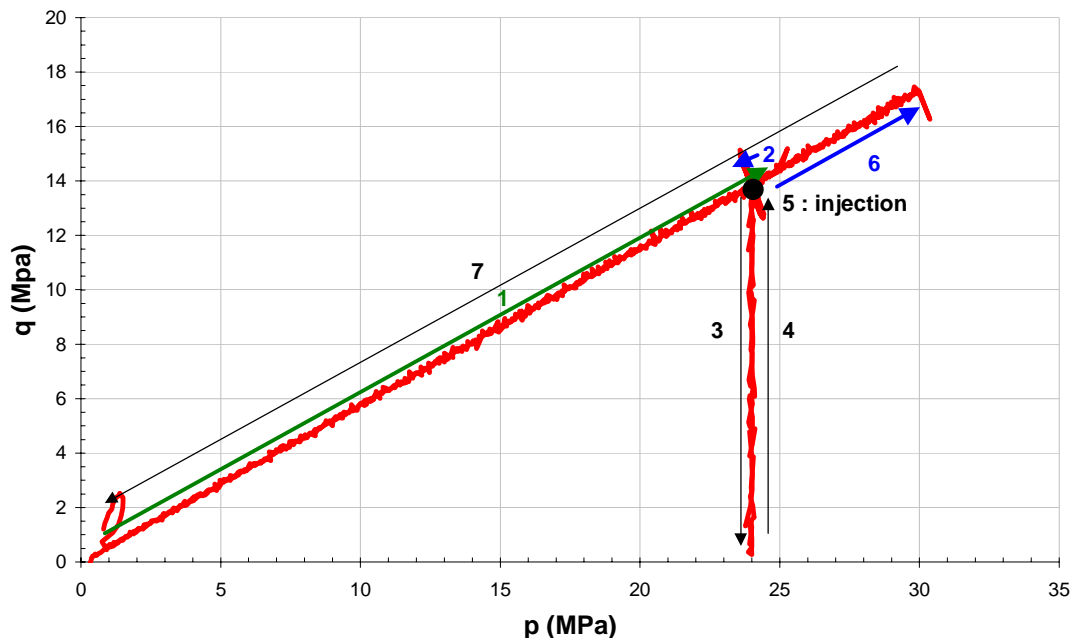


Figure 4-28 : Chemin de contraintes
Essais de waterflooding complémentaires

- phase 1 : chargement proportionnel, avec $\theta = 30^\circ$ ($\theta = \arctg (q / p')$), jusqu'à $q = 15$ MPa ($p = p' = 25$ MPa);
- phase 2 : petit déchargement avec $\theta = 30^\circ$, jusqu'à $q = 14$ MPa;
- diminution de q , avec p constant (à 24 MPa), jusqu'à $q = 0.5$ MPa;

Au cours de ces phases, la contrainte axiale est la contrainte principale majeure, σ_1 ; la contrainte radiale (pression de confinement) étant la contrainte principale mineure, σ_3 ;

- phase 4 : augmentation de q , avec p constant à 24 MPa mais avec *inversion* des contraintes principales, σ_1 ; étant maintenant la contrainte radiale (pression de confinement) et σ_3 étant la contrainte axiale. Ce chemin ramène l'échantillon dans le même état de contraintes qu'à la fin de la phase 2 mais avec inversion des contraintes principales;
- phase 5 : dans cet état de contraintes, constant, injection d'eau, verticalement (donc dans la direction de σ_3);
- phase 6 : chargement proportionnel ($\theta = 30^\circ$) jusqu'à $q = 17.5$ MPa ($p = 30$ MPa)
- phase 7 déchargement proportionnel ($\theta = 30^\circ$)

Pour permettre une comparaison correcte, des essais "d'étalonnage" ont été réalisés en suivant exactement le même chemin de contraintes mais *sans inversion* des contraintes principales.

Les résultats sont donnés, sous formes de diagrammes contraintes déviatoriques (q) - déformation (déformation axiale, ε_1 (ou E1) et déformation radiale, ε_3 (ou E3) (Figure 4-29 à Figure 4-32).

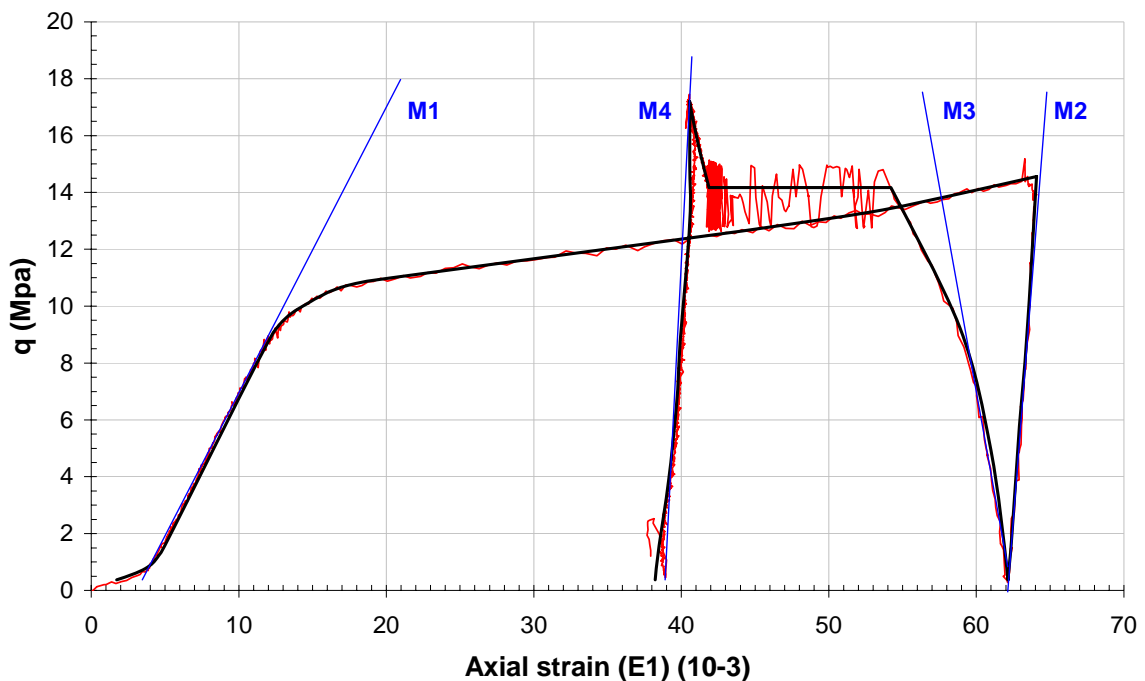


Figure 4-29: Essai de waterflooding avec contraintes principales inversées - Evolution des déformations axiales.

M1 à M4 : définitions des modules dans les différentes phases

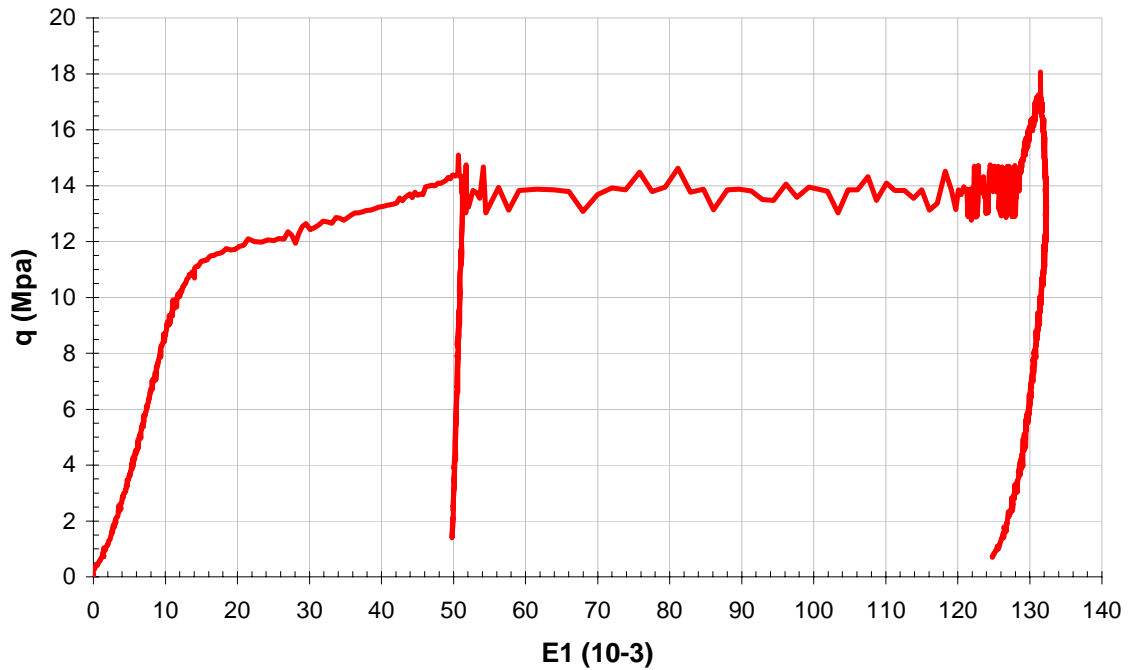


Figure 4-30 ; Essai de waterflooding de comparaison, avec contraintes principales **non** inversées - Evolution des déformations axiales
N.B. : l'échelle horizontale est le **double** de celle de la figure précédente

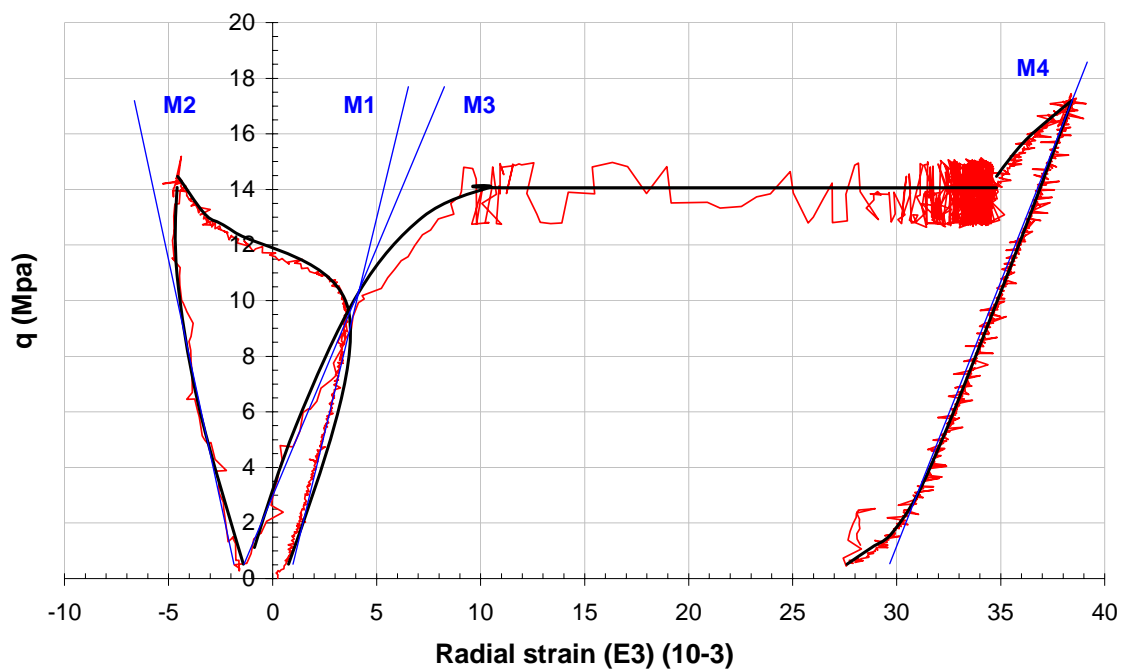


Figure 4-31 : Essai de waterflooding avec contraintes principales inversées - Evolution des déformations radiales.
M1 à M4 : définitions des modules dans les différentes phases

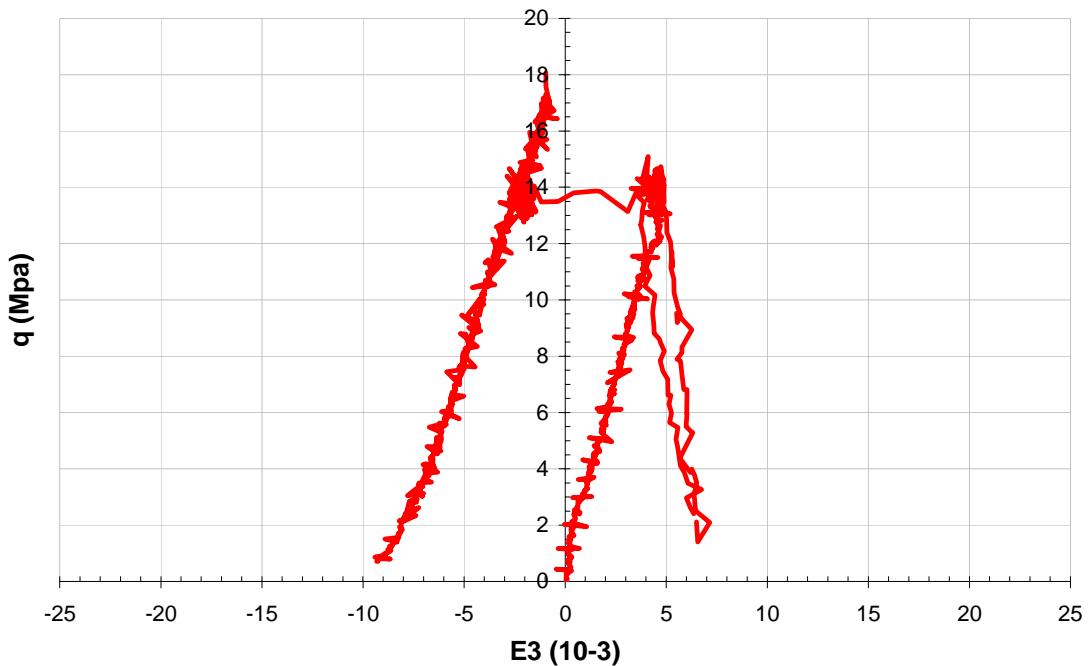


Figure 4-32 : Essai de waterflooding de comparaison, avec contraintes principales **non** inversées - Evolution des déformations radiales
N.B. : l'échelle horizontale est la **moitié** de celle de la figure précédente

Ces diagrammes permettent les conclusions suivantes :

- à la dispersion près, les ruptures sont conformes aux surfaces de charge de la craie saturée en Soltrol ("pore collapse" à $q = 9 \text{ MPa}$ et $p' = 14 \text{ MPa}$) (Figure 4-8).
- l'anisotropie par rapport au front de déplacement se marque nettement : si la déformation due à la contrainte mineure ne change pratiquement pas (la déformation radiale sans inversion vaut pratiquement la déformation axiale avec inversion, de l'ordre de $10 \cdot 10^{-3}$), celle due à la contrainte majeure est nettement plus élevée dans le sens de progression du front d'injection ($80 \cdot 10^{-3}$ que dans le sens perpendiculaire ($25 \cdot 10^{-3}$).

D'autres essais d'injections ont eu lieu à divers états de contraintes, atteints par chargements proportionnels et ont confirmé les résultats précédents (Monjoie, Schroeder et al., 1999).

Il est superflu de les détailler ici mais ils ont toutefois une particularité intéressante qui mérite d'être mentionnée brièvement.

Ces essais ont été réalisés en deux phases successives.

Au cours de la première phase, les échantillons de craie de Lixhe, saturés en Soltrol, ont été chargés suivant un chemin proportionnel jusqu'à un niveau défini puis ont été soumis à waterflooding et déchargés.

Les diagrammes contraintes - déformations suivants (Figure 4-33) donnent des exemples des résultats de la première phase.

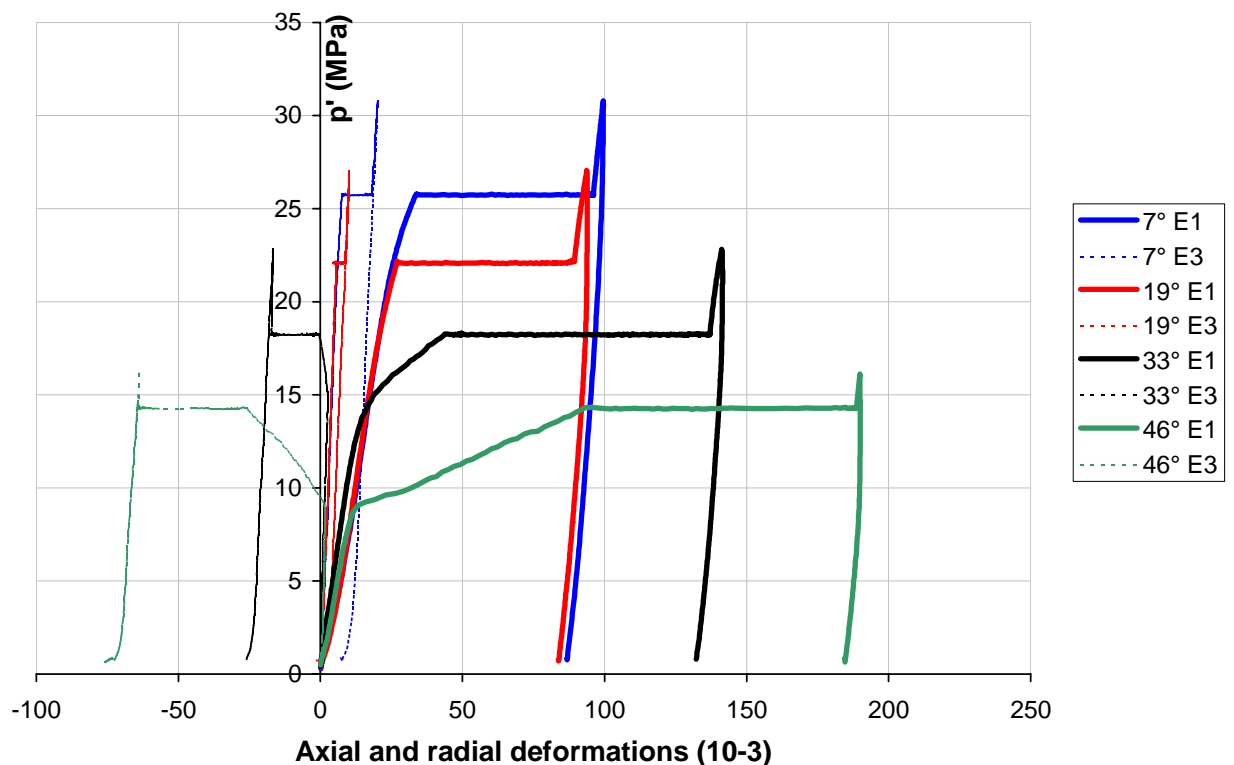


Figure 4-33 : Essais proportionnels sur craies de Lixhe et waterflooding - diagrammes contraintes - déformations - première phase

Les chiffres de la légende indiquent l'angle θ du chemin proportionnel.

On voit que le waterflooding provoque des déformations additionnelles d'autant plus importantes que la composante déviatorique de l'état de contraintes est élevée (Figure 4-34).

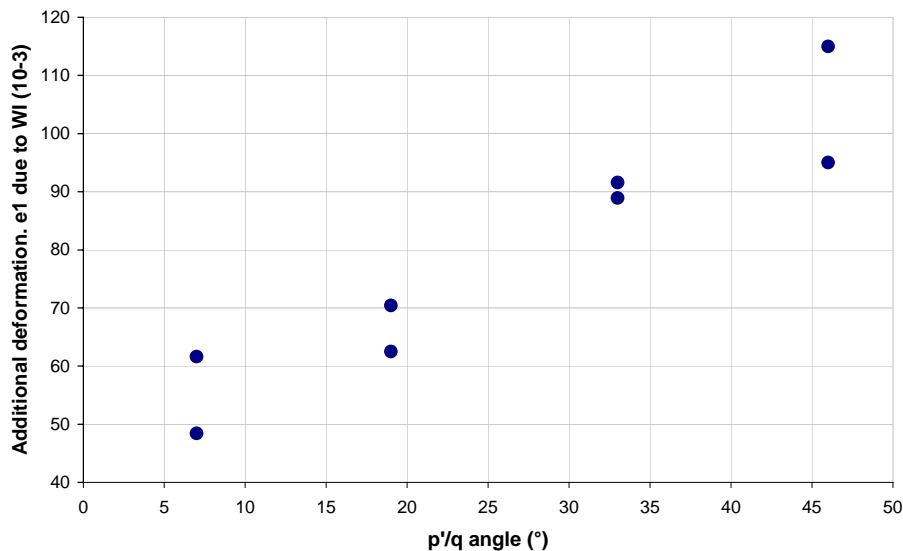


Figure 4-34 : Déformations additionnelles durant le waterflooding, fonctions de l'état de contraintes .

En seconde phase, après le déchargement, les échantillons ont été séchés, resaturés en Soltrol et rechargés avec des chemins proportionnels similaires à ceux utilisés en première phase, jusqu'au maximum des possibilités de l'équipement.

Des exemples de diagrammes contraintes - déformations obtenus en seconde phase sont donnés ci-après (Figure 4-35).

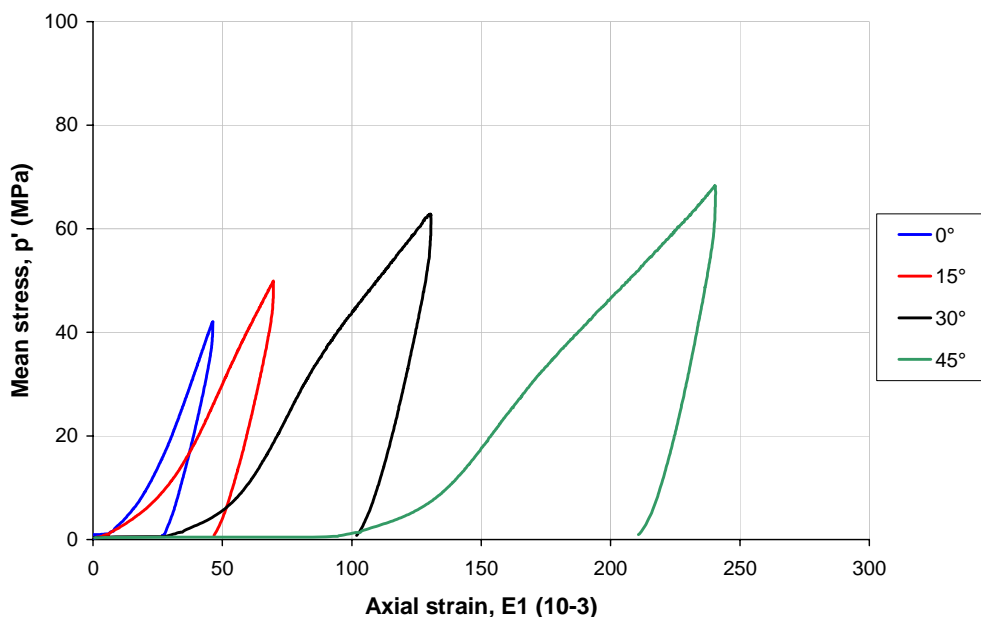


Figure 4-35 Essais proportionnels sur craies de Lixhe et waterflooding - diagrammes contraintes - déformations - seconde phase

Cette figure montre que, même après avoir subi une déformation par waterflooding, pouvant atteindre 10 %, les craies sont tout autant écrouies que lors des essais cités au § 4.5., avec comme conséquence que les "pore collapse" ne sont pas atteints aux contraintes maximum possibles pour l'équipement (pression de confinement et contrainte axiale maximum de 60 MPa)

4.7.4 Influence du degré initial de saturation en eau

Les chapitres précédents ont montré que les comportements des craies "à l'huile" et "à l'eau" sont bien distincts et que le waterflooding permet de passer d'une manière irréversible du premier au second.

Il a été signalé au § 4.4.1, sur la modélisation, que la plupart des modèles considéraient ce passage comme un "saut", le matériau ayant les propriétés mécaniques "à l'huile" avant l'injection et "à l'eau" après.

Dans la réalité, le comportement de la craie n'est pas quantique et le changement est continu, même s'il est brusque.

Le modèle Pasachalk prend cette continuité en compte, par l'intermédiaire de la succion. Cette dernière peut être étudiée à partir des courbes de rétention, comme il a été vu au § 2.5.3.3

Pour la craie de Lixhe, les courbes de rétention eau - huile (Pasachalk, 2001) sont données ci-dessous (Figure 4-36).

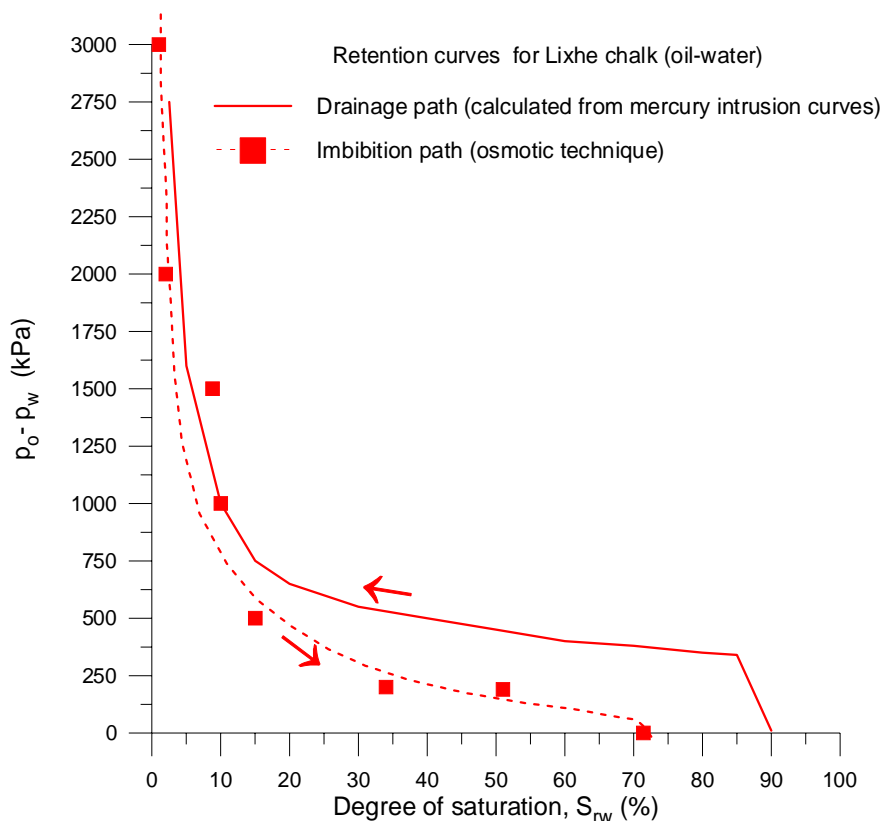


Figure 4-36 ; Courbes de rétention eau - huile, craie de Lixhe (Pasachalk, 2001)

Ces courbes sont établies suivant un processus d'imbibition (par méthode osmotique (voir § 2.5.3.2.) et de drainage, à partir des courbes d'injection de mercure.

Elles suggèrent que la variation de succion, faible pour des degrés de saturation en eau élevés (au moins supérieure à 10 à 15 %), est très rapide en dessous de $S_{wr} = 5\%$ (plus de 500 kPa par % de S_{wr}).

Des essais systématiques ont été réalisés dans le cadre de Pasachalk dans le but de vérifier si les propriétés mécaniques évoluaient de la même manière.

Deux types d'essais ont été réalisés.

Un premier ensemble d'échantillons a été soumis à essais de compression isotrope.

Ces échantillons avaient été saturés en eau puis séchés à l'air jusqu'à des teneurs en eau variable. L'échantillon est ensuite conservé dans un petit récipient, durant plusieurs jours afin de permettre l'homogénéisation de l'humidité dans l'échantillon. La carotte est ensuite sortie du récipient, pesée pour déterminer la teneur en eau exacte à ce moment puis saturé en Soltrol et testée.

Quelques exemples des courbes contrainte - déformation obtenues sont donnés ci-dessous (Figure 4-37).

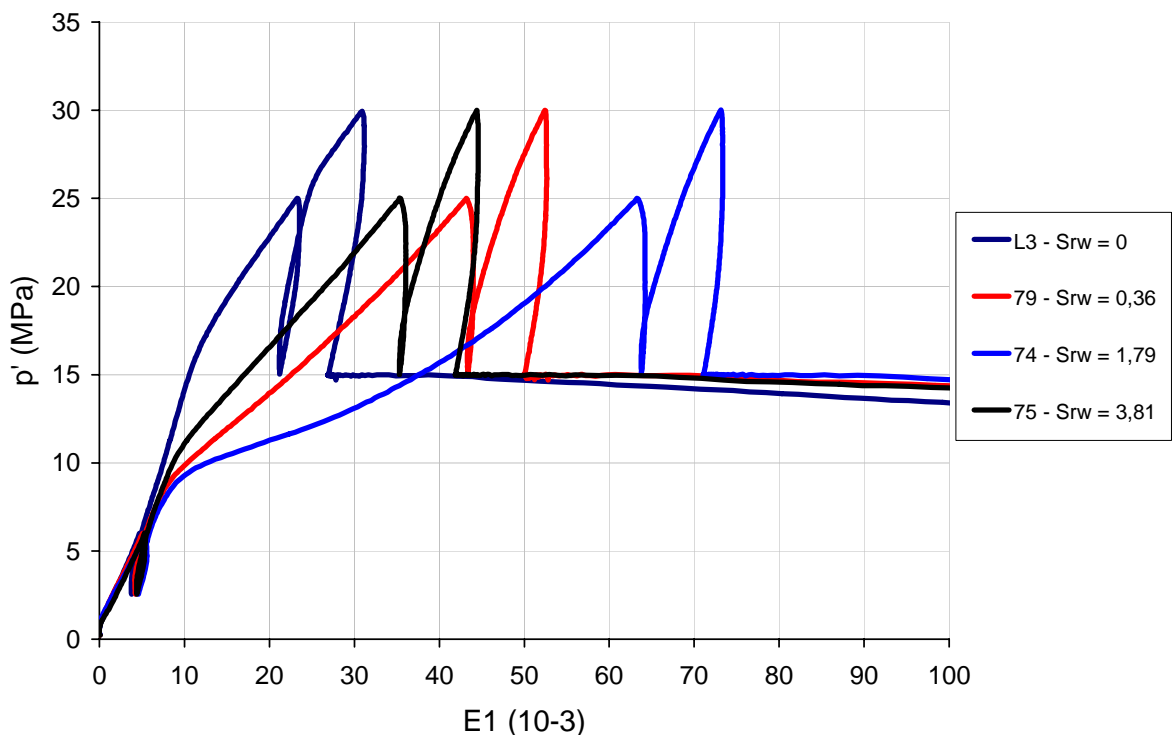


Figure 4-37 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Soltrol et eau avec différents degrés de saturation en eau, S_{wr}
Exemples de courbes contraintes - déformations

Ces essais ont permis de déterminer les différents "pore collapse". Le diagramme ci-dessous (Figure 4-38) donne les valeurs des "pore collapse" mesurés, en fonction du degré de saturation en eau initial des échantillons, S_{wr} .

On voit la bonne concordance avec la courbe de rétention par drainage obtenue précédemment (Figure 4-36), caractérisée par une courbure accentuée entre 0 et 10 % de degré de saturation initiale en eau.



Figure 4-38 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Sol-trol et eau avec différents degrés de saturation en eau, S_{wr} . Evolution du "pore collapse" en fonction de S_{wr} .

Cette courbe est confirmée par des essais (quasi-hydrostatiques⁴⁹) réalisés au Stavanger Collège (Madland, 1999, Risnes et al., 2000) sur de la craie de Lixhe saturée en eau ou en méthanol, à des degrés de saturation variables. Le diagramme (Figure 4-39) qui synthétise les résultats obtenus pour les deux fluides, montre aussi la résistance plus élevée de la craie saturée en méthanol par rapport à celle saturée à l'eau.

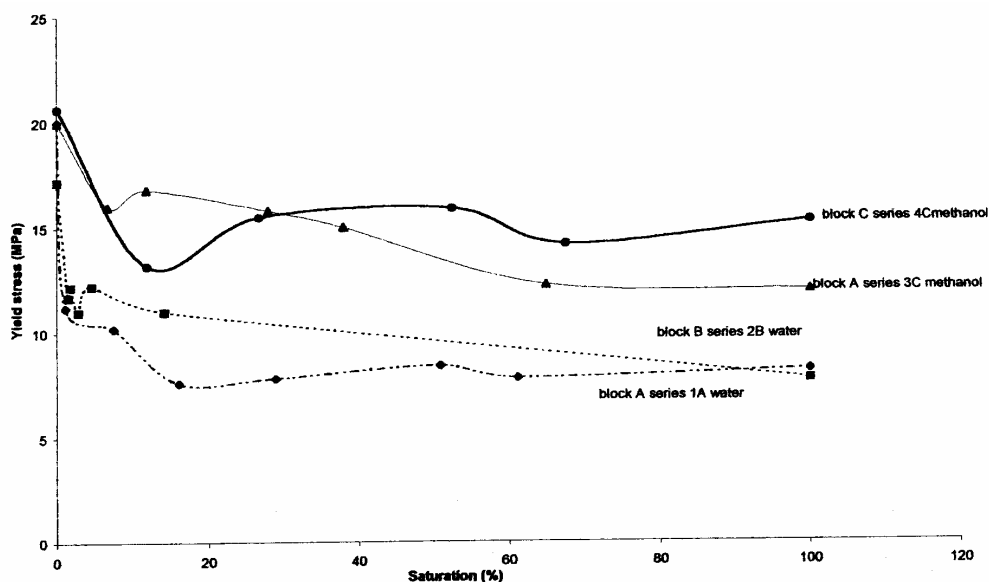


Figure 4-39 : Contrainte de rupture ("pore collapse") de craies de Lixhe soumise à essais quasi hydrostatiques, saturées en eau ou méthanol (saturations variables) (Madland, 1999).

⁴⁹ un très léger déviateur assure un bon contact du piston avec l'échantillon.

D'autres essais ont été réalisés en contrôlant la succion, donc en atteignant le degré de saturation en eau par mouillage (alors que dans les précédents essais, la teneur en eau initiale est atteinte par séchage).

Les essais ont comporté des chemins triaxiaux, isotropes et proportionnels. Les courbes contrainte - déformation de deux essais proportionnels sont données à titre d'exemple (Figure 4-40).

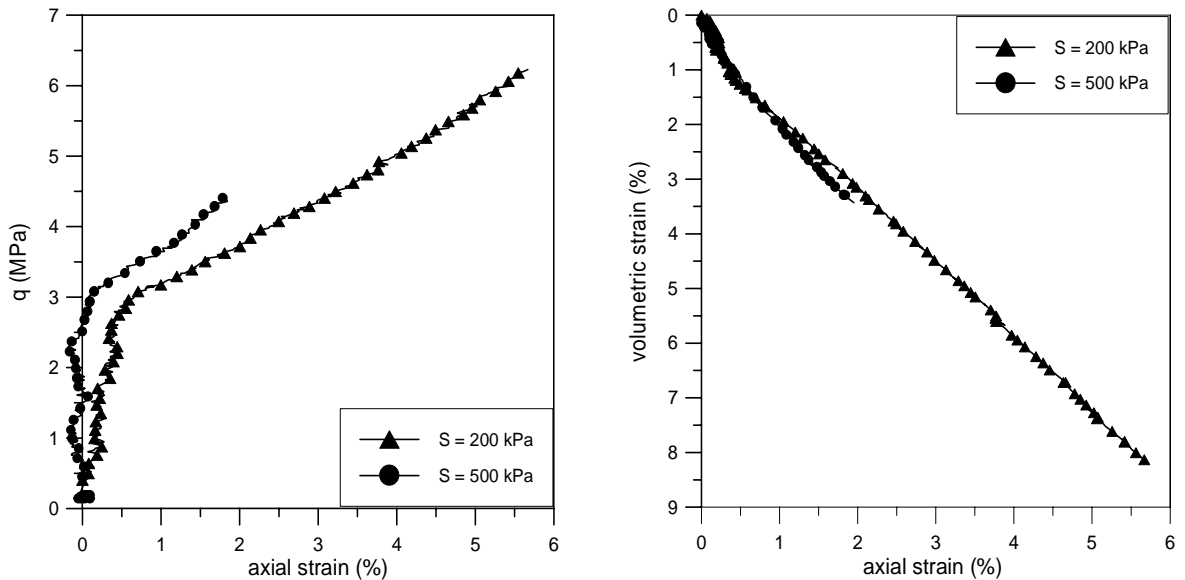


Figure 4-40: Résultats typiques d'essais proportionnels sur la craie de Lixhe à différents niveaux de succion (Pasachalk, 2001)

Les contraintes de rupture ("pore collapse"), portées sur le diagramme $p' - q$ (Figure 4-41) montrent les surfaces de charge dépendant de la succion. Ces surfaces sont en parfait accord avec celles déterminées précédemment (§ 4.5., Figure 4-8).

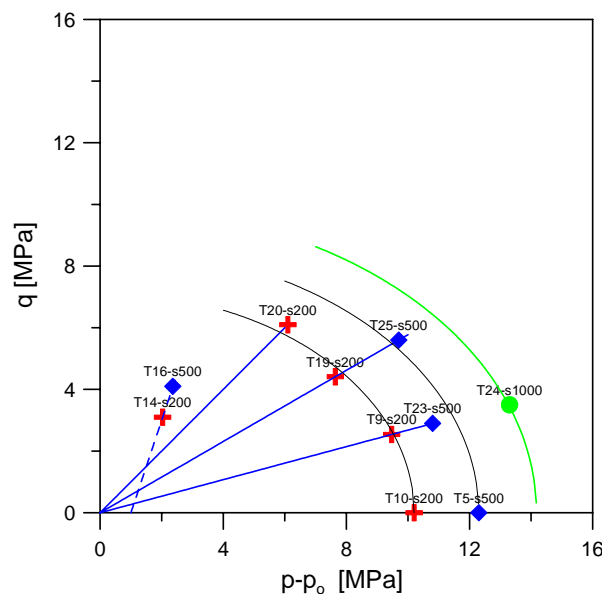


Figure 4-41: surfaces de charge déterminées à partir des essais à succion contrôlée (Pasachalk, 2001)

4.8 Effet de la température

A Ekofisk, la température du réservoir est de l'ordre de 120°C. Il est donc logique de se poser la question de savoir si les essais de laboratoire, généralement réalisés à la température ambiante (20°C) peuvent rendre compte des propriétés mécaniques de la craie à haute température.

Il peut donc sembler paradoxal que peu d'essais aient été menés à haute température. En fait, les complications expérimentales sont très contraignantes (étanchéité, tenue des capteurs, sécurité, durée etc.) et l'étude des différents facteurs peut très bien, dans un premier temps, se faire à température ambiante. Il n'empêche que le facteur température ne peut être négligé.

Il existe cependant un certain nombre d'essais à haute température mais leurs conclusions ne sont pas totalement cohérentes, comme le montrent les trois exemples suivants.

En 1985, des essais de compression isotrope ont été réalisés sur de la craie de Mer du Nord (Sarda, 1985), certains à 130°C. La conclusion est que la température augmente la déformabilité d'un facteur 1.6. Il faut cependant tenir compte de ce que l'essai de comparaison à température ambiante semble avoir été réalisé en un temps court (quelques heures) tandis que l'essai à 130°C a duré un mois et que donc l'effet du fluage (voir § 4.9) a pu se superposer à celui de la température de sorte qu'il est difficile de déterminer la part qui revient à chacun.

Une étude comportant au total 18 essais hydrostatiques et triaxiaux sur des craies à 40.5% de porosité, saturée en huile (Kerdane), testées à 20°C, 90°C et 120°C. a montré une nette influence de la température sur les paramètres élasto - plastiques (Charlez et al., 1992). Les conclusions de ces essais sont :

- les paramètres thermo - poro - élastiques ne sont pas affectés par la température;
- le niveau de "pore collapse" est fortement influencé par la température (en hydrostatique : 20 MPa à 20°C, 12 MPa à 90°C et 9 MPa à 120°C), de même que l'écrouissage;
- le mécanisme de rupture par cisaillement peut être considéré comme indépendant de la température.

Les essais de waterflooding à haute température réalisés dans le cadre du JCR V (Foged Christensen, 2000), concluent que les déformations additionnelles durant le waterflooding sont similaires à haute ou basse température bien qu'une injection d'eau de mer froide après l'injection d'eau de mer à haute température, cause encore une déformation supplémentaire. Les auteurs du rapport mettent cette déformation sur le compte des différences de viscosité en relation avec les températures.

L'effet de la température porterait donc davantage sur le comportement volumique et sur les propriétés de fluage mais au stade actuel, un bon nombre de questions restent posées.

4.9 Effet différé : fluage,

Les chapitres précédents ont traité de différents facteurs ayant une influence sur les caractéristiques mécaniques de la craie. Ces facteurs sont tous liés à la réponse instantanée de la déformation et de la rupture, ce qui est normal dans le cadre d'une loi de comportement élasto - plastique.

Un aspect supplémentaire du comportement de la craie est le fluage non négligeable qu'elle présente. Le fluage peut être défini comme la part visqueuse d'un comportement élasto-visco-plastique, comprenant des déformations irréversibles, fonctions du temps, du niveau et de la durée de la sollicitation, venant se superposer aux déformations élasto-plastiques.

Ce fluage est bien entendu à prendre en considération dans les études de gisements pétroliers. On a vu en effet au § 4.3 que le taux de déplétion moyen dans le réservoir d'Ekofisk était de $5 \cdot 10^{-8}$ MPa/s, ce qui est très différent des $1 \cdot 10^{-3}$ MPa/s généralement utilisés dans les essais de laboratoire.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'aspect expérimental du fluage, sans aborder la modélisation⁵⁰, sauf par une formulation empirique.

Cet aspect expérimental pose un certain nombre de problèmes dus, entre autres, à la durée des expériences si on veut approcher des valeurs plausibles des vitesses de chargement ou de déformation⁵¹.

Par ailleurs, dans d'autres modes opératoires, la dispersion des résultats empêche une interprétation correcte des essais. C'est ainsi qu'une technique d'essais de fluage consiste à soumettre l'échantillon à compression simple en le chargeant à une contrainte égale à une fraction de la contrainte de rupture.

L'enregistrement de la déformation en fonction du temps fait apparaître les phases classiques (Figure 4-42) : déformation instantanée, fluage primaire, secondaire et tertiaire qui aboutissent à la rupture. En répétant l'opération pour différentes valeurs du chargement, on peut tracer la droite joignant les points d'inflexion du fluage secondaire et déterminer ainsi la valeur du paramètre de fluage. La difficulté est que la dispersion des essais ne permet pas d'apprécier avec précision à quelle proportion de la contrainte de rupture les échantillons ont été chargés⁵².

De plus, cette technique se limite au cas de la compression simple et c'est pourquoi, il est préférable d'étudier le fluage en réalisant des essais à différentes vitesses (de contraintes ou de déformation)

⁵⁰ la modélisation du fluage et l'incorporation de cet aspect dans la loi de comportement Pasachalk est un des objectifs du projet européen Pasachalk2 (2000 - 2003) en cours.

⁵¹ le problème de savoir s'il faut travailler à contrainte contrôlée ou à déformation contrôlée est toujours en discussion. On peut ainsi estimer que, pour l'étude du fluage, les déformations contrôlées sont préférables à partir du moment où on s'intéresse aux "deux côtés" du "pore collapse" (la partie "élastique" et la partie plastique") car alors, une vitesse de chargement constante provoque des vitesses de déformations différentes de part et d'autre du "pore collapse".

⁵² la corrélation E, σ_c (Figure 4-1) pourrait cependant être utilisée pour résoudre le problème.

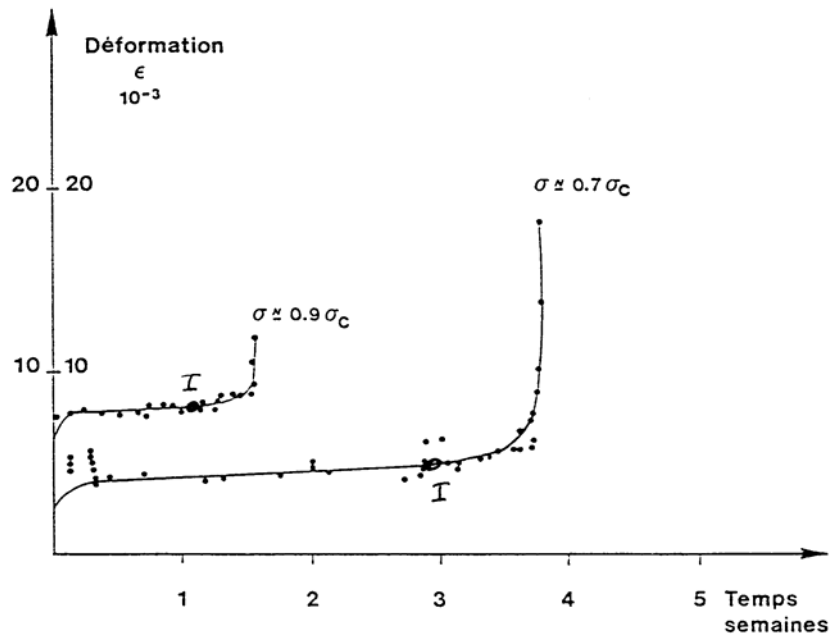


Figure 4-42: Essai de fluage (rapport interne LGIH - FOR882)

Un premier exemple d'effet du temps est donné par les courbes contrainte - déformation volumique d'essais isotropes réalisés aux LGIH sur de la craie de Lixhe saturée en méthanol (JCRII-SPV, non publiées) (Figure 4-43).

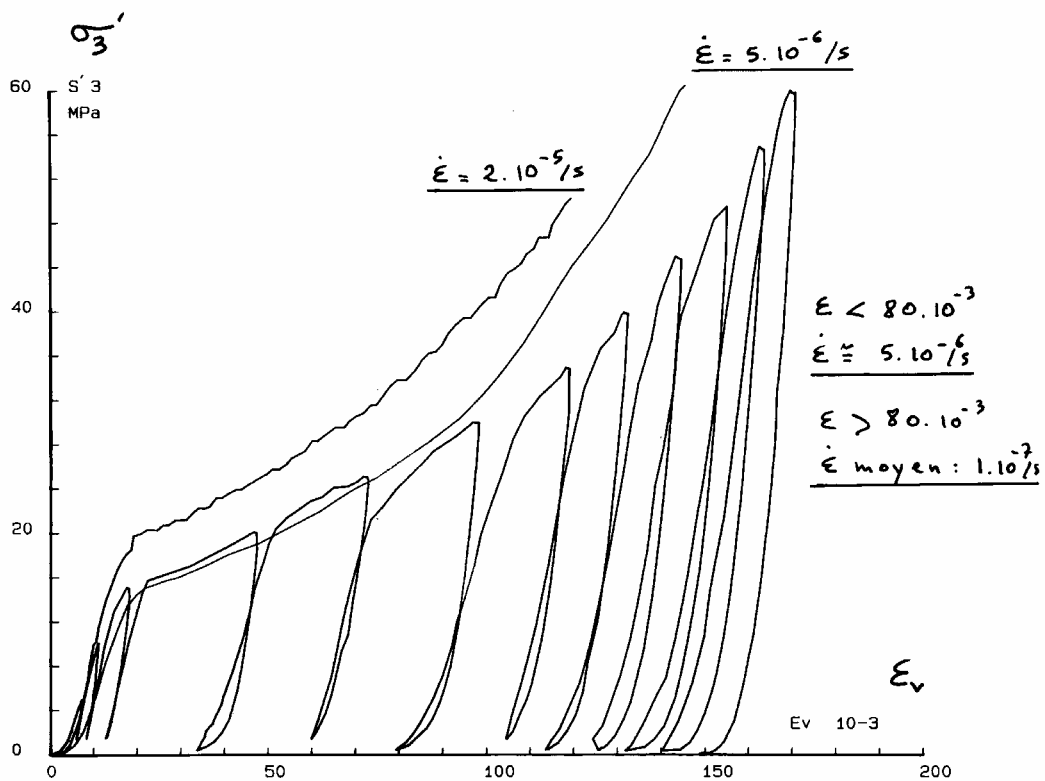


Figure 4-43 : essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en méthanol

L'essai réalisé avec une vitesse de déformation de 2.10^{-5} /s a un "pore collapse" plus élevé et une courbe contrainte - déformation distincte par rapport aux deux autres. Ces derniers sont tous deux réalisés avec une vitesse de 5.10^{-6} /s et ont des "pore collapse" égaux et des courbes contrainte - déformation identiques en début d'essai. Ensuite, les cycles de déchargement - rechargement d'un des essai lui confèrent une vitesse de déformation globale moyenne de 1.10^{-7} /s et la courbe contrainte - déformation se détache de celle de l'autre essai.

Cet effet des cycles de chargement -déchargement a aussi été observé, au cours d'essais légèrement différents (Risnes & Nygaard, 2000). Ces essais ont consisté en essais triaxiaux à 1.5 MPa de confinement., comprenant deux fois 5 cycles de chargement -déchargement sur craie de Lixhe saturée en eau, méthanol ou huile. L'exemple de diagramme effort - déformation donné ci-dessous montre bien la déformation progressive (Figure 4-44).

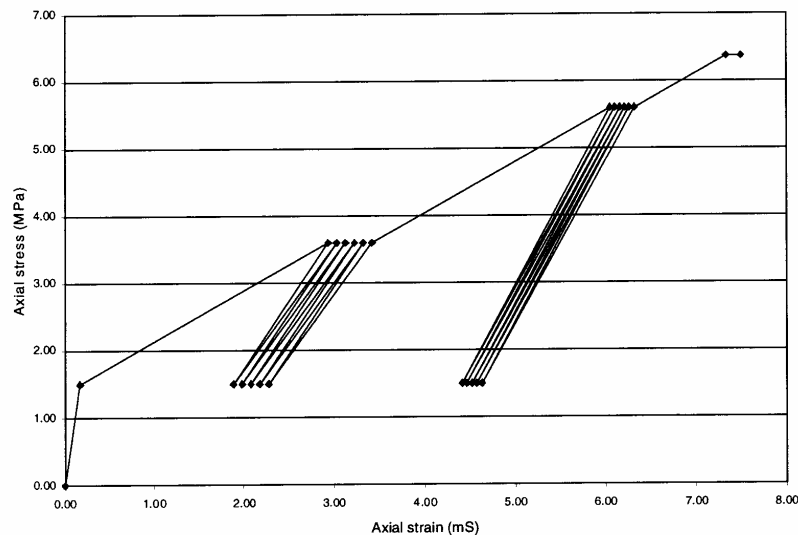


Figure 4-44 : Essai triaxial ($\sigma_3 = 1.5$ MPa) sur craie de Lixhe saturée à l'eau. - courbe contrainte - déformation (Risnes & Nygaard, 2000)

Les valeurs de E et ν . mesurées au cours de ces essais figurent au tableau ci-après (Tableau 4-6)

Il faut noter que durant les cycles, les déformations augmentent sous l'effet du fluage, sans donner de signe de stabilisation. Un essai de fluage sous contrainte constante, réalisé sur un échantillon "compagnon" a montré une déformation sous fluage du même ordre de grandeur que l'accroissement de déformation durant les cycles (d'une durée de 150 minutes pour chaque cycle).

A noter aussi que l'effet de fluage est moindre pour les échantillons saturés en méthanol que pour ceux saturés à l'eau, ce qui est un argument en faveur de l'hypothèse des phénomènes de dissolution - recristallisation pour expliquer le fluage (voir § 4.11).

Tableau 4-6 : Essais triaxiaux sur craies de Lixhe - Modules E moyens et coefficients de Poisson (d'après Risnes & Nygaard, 2000).

Conditions de contraintes	Eau (6 éch.)		Méthanol (6 éch.)		Huile (2 éch.)	
	E (GPa)	ν	E (GPa)	ν	E (GPa)	ν
Chargement initial	0.76	0.16	1.3	0.20	1.8	0.26
1er cycles - déchargement	2.0	0.27	3.0	0.30	3.3	0.35
1er cycles - rechargement	1.8	0.23	2.9	0.27	3.1	0.22
2èmes cycles - déchargement	2.5	0.36	3.2	0.35	3.5	0.36
2èmes cycles - rechargement	2.4	0.34	3.1	0.30	3.3	0.34

Ces essais confirment aussi que la phase de chargement initiale est "pseudo-élastique" c'est-à-dire plus ou moins linéaire mais avec une part de déformation irréversible.

L'effet du fluage peut également être mis en évidence en travaillant avec différentes vitesses de chargement.

Des exemples d'essais réalisés aux LGIH, entre autres dans le cadre du projet Pasachalk 2, sur des craies saturées en huile (Figure 4-45) et en eau (Figure 4-47) sont présentés ci-dessous.

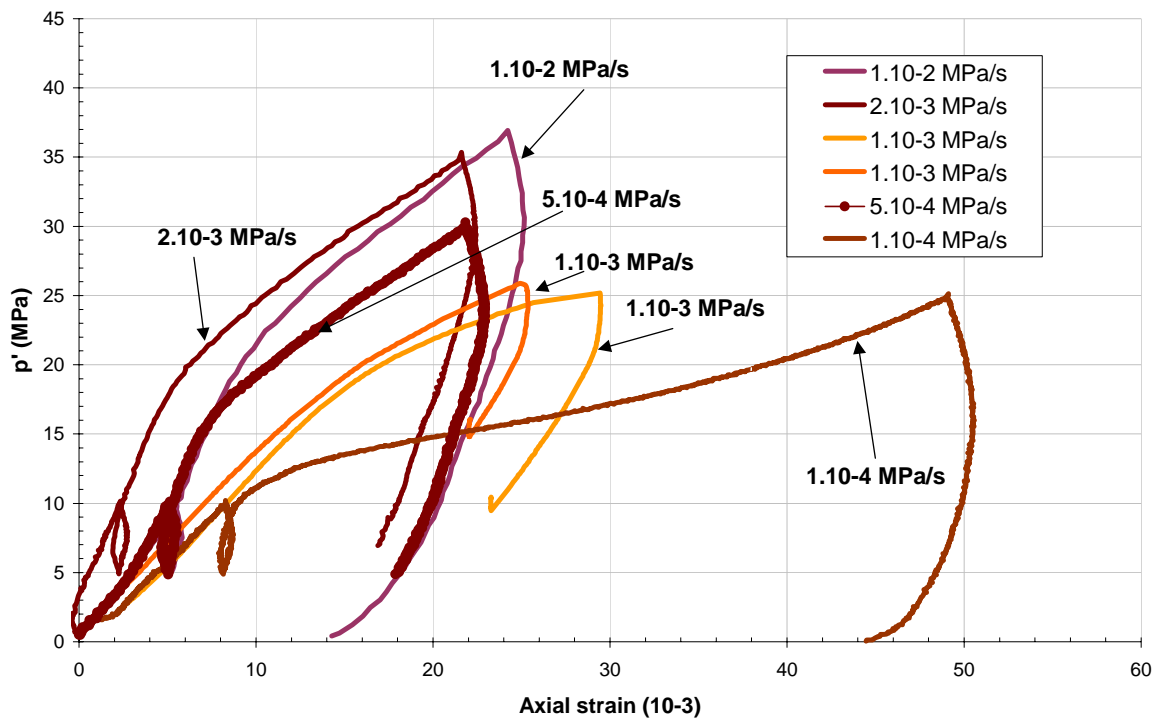


Figure 4-45 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en Soltrol - différentes vitesses de mise en charge.

On remarque la variation de "pore collapse" en fonction des vitesses de chargement : 12 MPa pour une mise en charge de 1.10^{-4} MPa/s, 16 à 19 MPa pour 1.10^{-3} MPa/s, 18 MPa pour 2.10^{-3} MPa/s à 22 MPa pour 1.10^{-2} MPa/s.

La dispersion inhérente au matériau est assez importante mais on peut cependant voir que la relation entre le "pore collapse" et la vitesse de chargement est assez nette, comme indiqué sur un diagramme semi-logarithmique (Figure 4-46). Les variations de modules sont moins évidentes à distinguer.

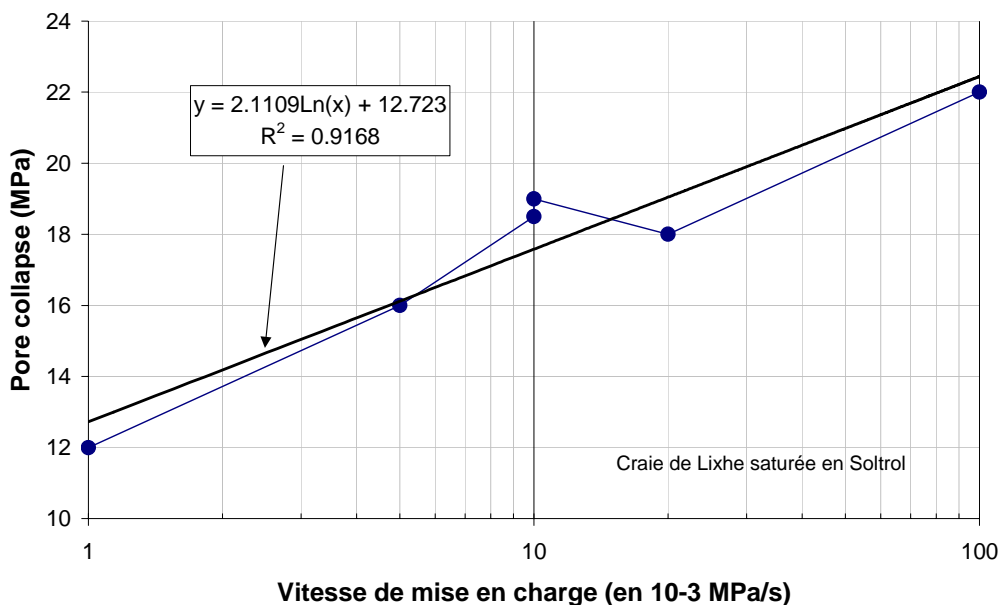


Figure 4-46 : relation entre "pore collapse" et vitesse de chargement essais isotropes sur craie de Lixhe saturée en Soltrol

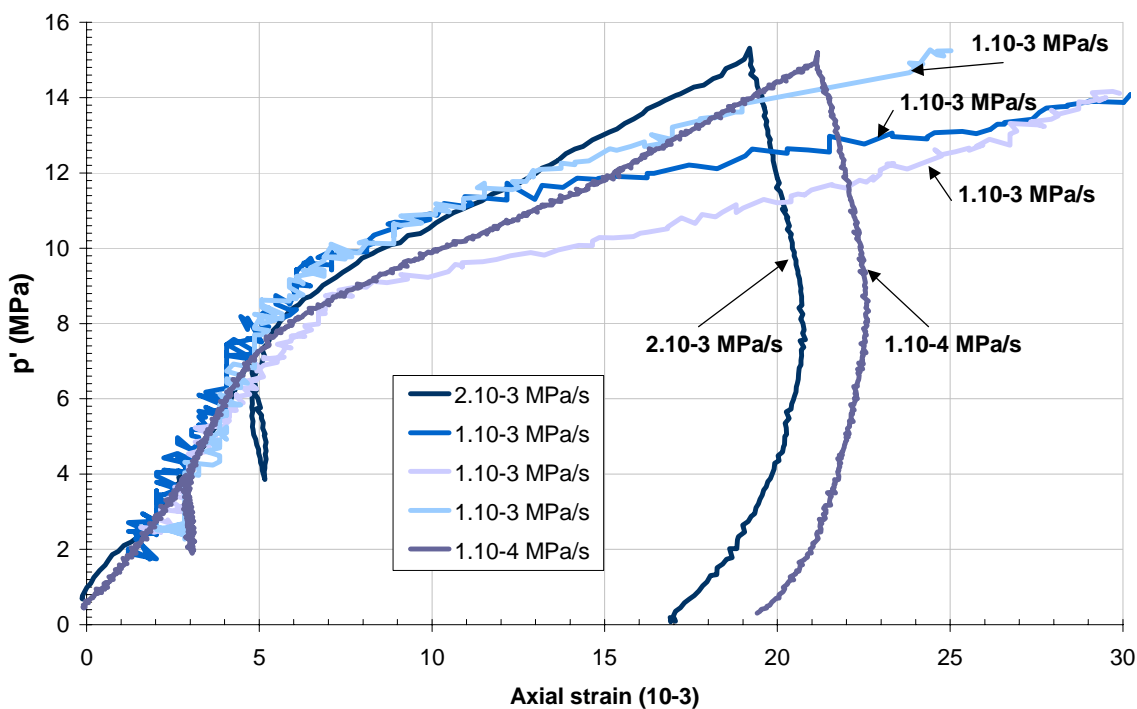


Figure 4-47 : Essais de compression isotrope sur craie de Lixhe saturée en eau - différentes vitesses de mise en charge.

Les principales difficultés d'interprétation des essais de fluage sont liées à la dispersion des résultats en raison de la variabilité d'un échantillon à l'autre (même si les échantillons sont prélevés dans un même bloc de craie) , comme il a été vu par tomographie aux rayons X, au § 2.4.2.3.

Un mode opératoire particulier permet d'étudier le fluage sur un même échantillon en le testant avec deux ou trois vitesses de chargement différentes au cours du même essai.

Ce mode opératoire est basé sur la procédure établie par de Waal (de Waal & Smits, 1985; Smits et al., 1986) et perfectionnée aux LGIH. Le détail de cette procédure se trouve dans la publication en annexe (Monjoie, Schroeder et al., 1991). Elle est résumée ci-après.

La base théorique de la procédure est illustrée ci-dessous (Figure 4-48).

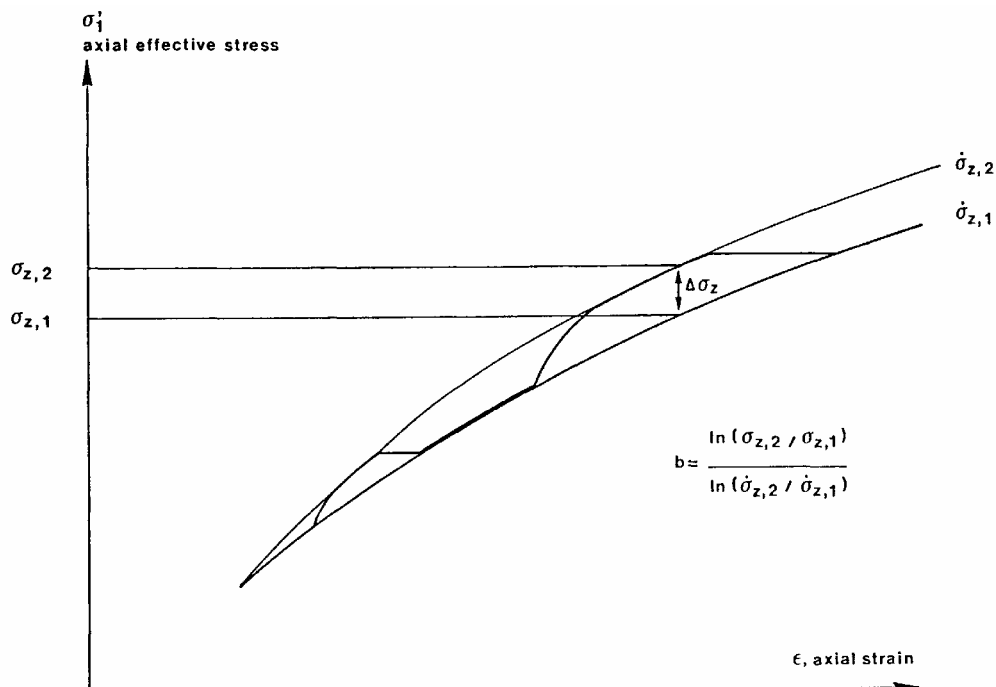


Figure 4-48 : principe de la procédure "de Waal" pour essais de fluage.

Sur ce diagramme contrainte - déformation, deux courbes sont représentées. Elles correspondent à deux vitesses différentes de mise en charge: la courbe supérieure correspond à un chargement "rapide", $\sigma_{z,2}^*$, tandis que la courbe inférieure est relative à un chargement "lent", $\sigma_{z,1}^*$.

L'écart entre les deux courbes, $\Delta\sigma_z$, dépend du niveau de contraintes, σ_{z1} , du rapport des deux vitesses de chargement, $\sigma_{z,2}^*/\sigma_{z,1}^*$, et d'un coefficient caractéristique du matériau, b :

$$\Delta\sigma_z = \sigma_{z1} [(\sigma_{z,2}^*/\sigma_{z,1}^*)^b - 1]$$

Pour la craie, le coefficient b varie entre 0.01 et 0.06 (Monjoie, Schroeder et al., 1991)

De plus, lors de tout changement de la vitesse de mise en charge (augmentation de la vitesse de $\sigma_{z,1}^*$ à $\sigma_{z,2}^*$ ou, après un chargement "rapide" à $\sigma_{z,2}^*$, maintien de la contrainte à un niveau constant durant le temps nécessaire pour qu'en moyenne, le chargement ait été fait à $\sigma_{z,1}^*$) la courbe contrainte - déformation passe de la courbe inférieure à la courbe supérieure ou réciproquement.

La procédure expérimentale consiste donc à faire suivre une mise en charge "lente" par une mise en charge "rapide" suivie d'un maintien de la contrainte constante, appelé "stabilisation", le temps nécessaire pour obtenir une vitesse moyenne égale à la vitesse lente puis de recommencer le cycle.

Le mode opératoire est illustré par la figure ci-dessous (Figure 4-49). Elle donne l'évolution des contraintes et de la déformation axiale, en fonction du temps pour un échantillon de Mer du Nord à 47.3% de porosité, testé en essai uniaxial par déplétion en conditions de réservoir (voir description de la procédure au § 4.6)

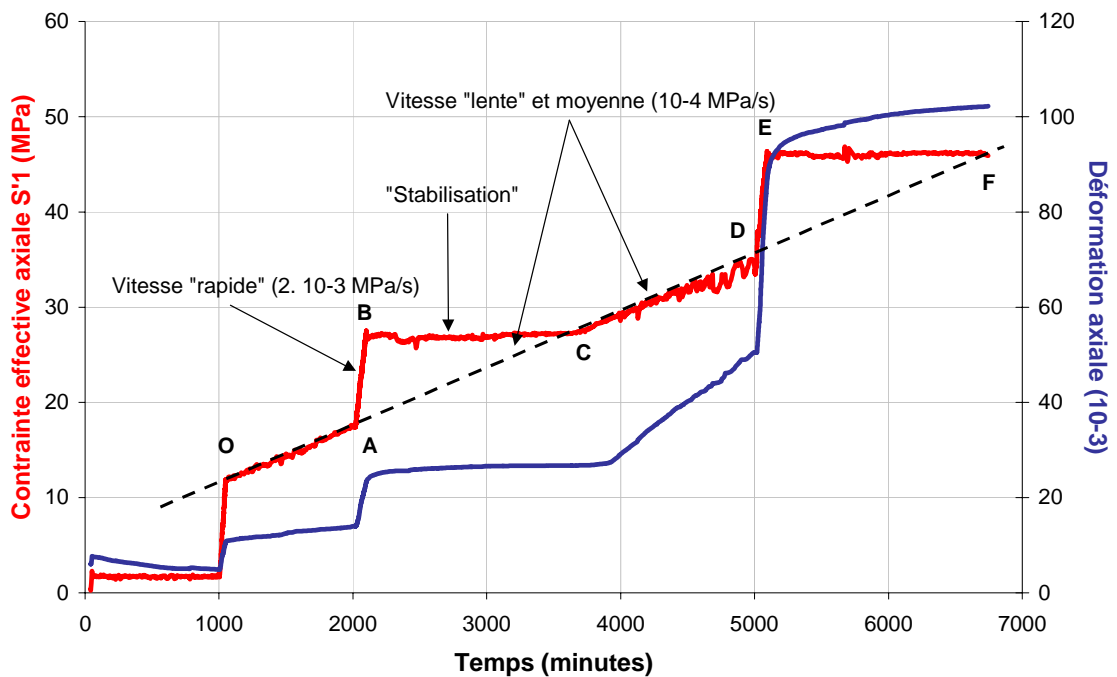


Figure 4-49: Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 47.3\%$) - évolution en fonction du temps de la contrainte effective axiale (en rouge) et de la déformation axiale (en bleu)

En O, l'échantillon est en conditions de réservoir⁵³ de type Ekofisk, le chargement est "lent" (1.10^{-4} MPa/s) de O à A, et de C à D. Les chargements "rapides" (2.10^{-3} MPa/s) se font : de A à B, suivi d'une stabilisation de B à C et de D à E, suivi d'une stabilisation de E à F.

Sur le diagramme contrainte effective axiale - déformation axiale du même échantillon sont tracées (Figure 4-50) les enveloppes des deux vitesses de chargement. Notons que, pour que les enveloppes soient suffisamment distinctes, il a fallu un rapport de 1 à 20 entre les vitesses "lente" et "rapide".

⁵³ $\sigma_1 (S1) = 60$ MPa, $\sigma_3 (S3) = 55$ MPa; $u = 48$ MPa

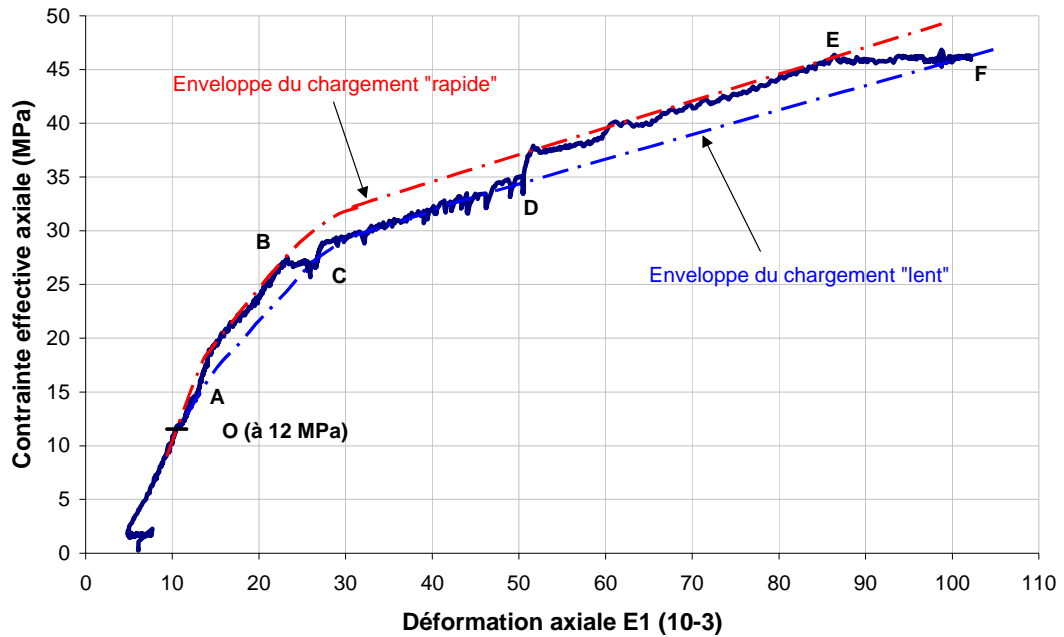


Figure 4-50 :Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 47.3\%$) - contrainte effective axiale en fonction de la déformation axiale. Les lettres correspondent à celles de la figure 5-51.

L'essai présenté aux figures ci-dessus a été réalisé sur un échantillon de forte porosité (47.3 %). Le même comportement s'observe sur des échantillons moins poreux, y compris pour les échantillons à basse porosité (VLP) qui atteignent à peine le "pore collapse" aux plus hautes contraintes effectives. Des exemples pour des craies à 39.4 % de porosité et 33.7 % de porosité suivant les mêmes chemins de contraintes sont données ci-dessous (Figure 4-51 et Figure 4-52).

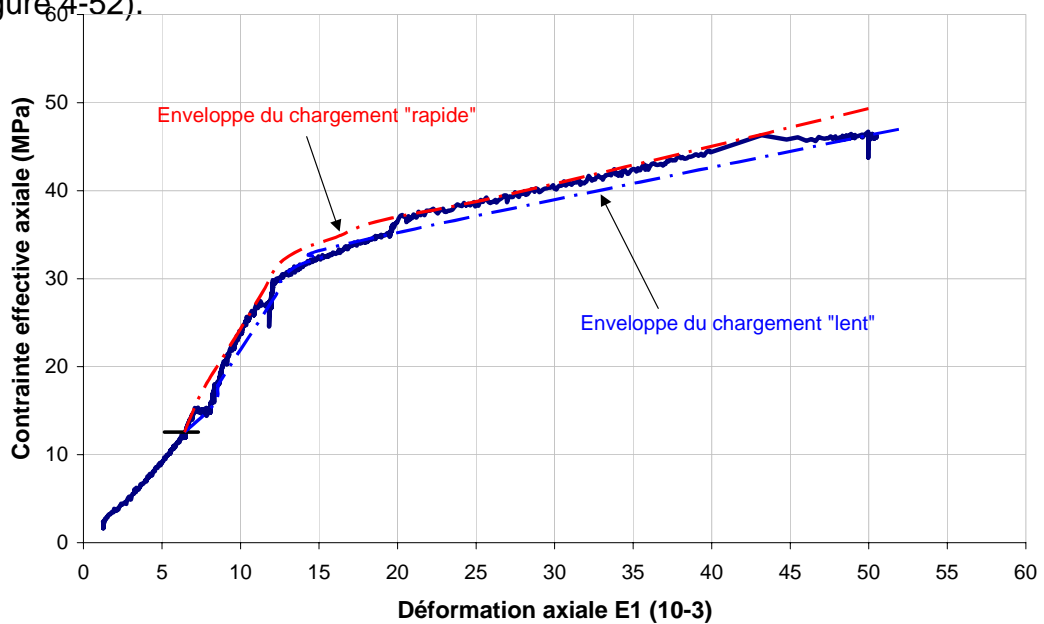


Figure 4-51 :Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 39.4\%$) - diagramme contrainte - déformation

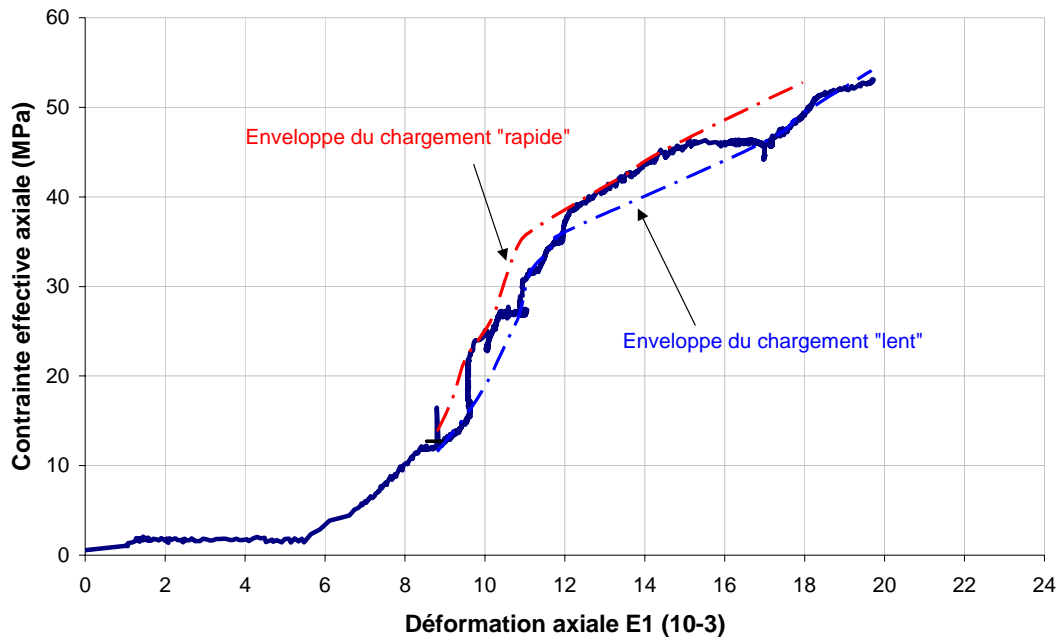


Figure 4-52 : Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 33.7\%$) - diagramme contrainte - déformation

Au cours des phases de "stabilisation", la craie flue sous charge constante, permettant une approche supplémentaire du fluage. Un agrandissement de la partie A-D de l'essai sur la craie à 47.3 % de porosité (Figure 4-50) montre que l'évolution de la déformation durant la "stabilisation" (entre B et C) suit une loi qui semble asymptotique (Figure 4-53).

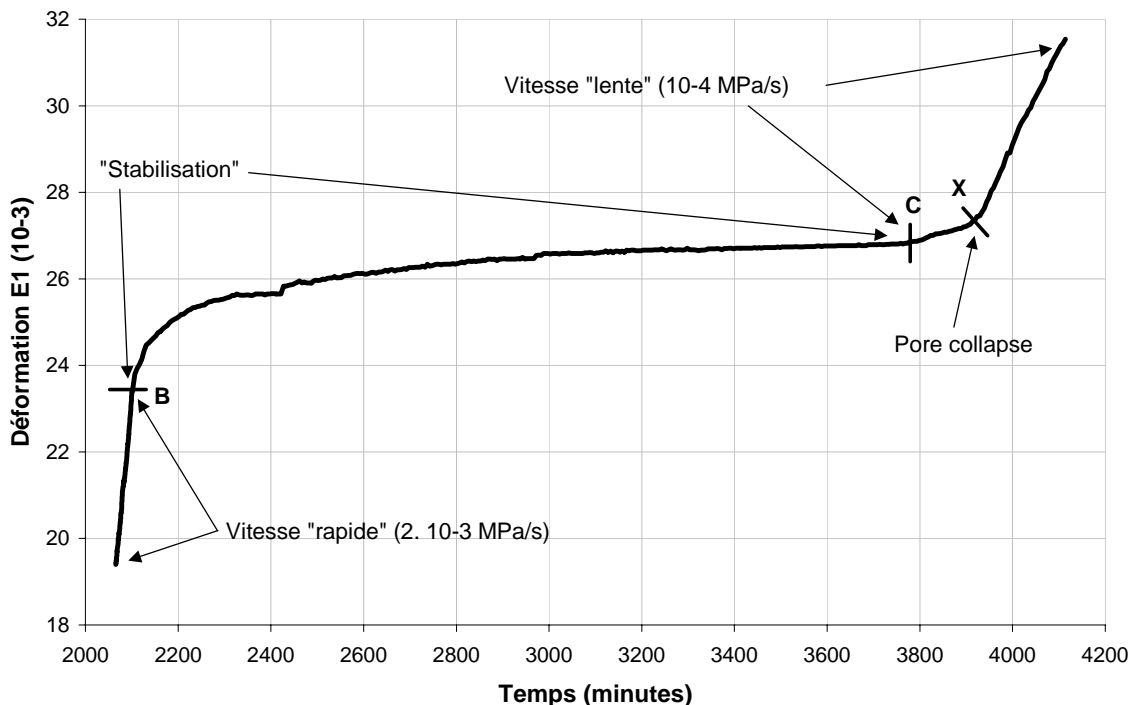


Figure 4-53 : Essai de compression uniaxiale sur échantillon de Mer du Nord saturé en huile ($n = 47.3\%$) - Phase de "stabilisation"

Notons qu'au-delà de la stabilisation (au delà du point C), le chargement reprend avec une vitesse "lente" de $1 \cdot 10^{-4}$ MPa/s, ce qui se traduit par une vitesse de déformation de l'ordre de $5 \cdot 10^{-8}$ /s jusqu'au point X où survient le "pore collapse". Au delà du point X, bien que la vitesse de chargement soit toujours de $1 \cdot 10^{-4}$ MPa/s, la vitesse de déformation est passée à environ $35 \cdot 10^{-8}$ /s.

La forme de la courbe de fluage au cours de la "stabilisation" est similaire à celle des courbes de consolidation obtenues au cours d'essais oedométriques.

Il est donc possible d'interpréter la courbe de fluage avec les méthodes utilisées en mécanique des sols⁵⁴, ce qui permet de vérifier si le fluage de la craie participe d'un phénomène de consolidation (au sens de Terzaghi).

En effet, l'interprétation en terme d'essai oedométrique donne le coefficient de consolidation C_v .

Si le fluage est de la consolidation, la relation entre C_v , le coefficient de perméabilité, k , et le module oedométrique, E_o , doit être satisfaite

$$k = \frac{C_v \cdot \gamma_w}{E_o} \quad \text{avec } \gamma_w : \text{ poids volumique du fluide}$$

L'interprétation de l'essai présenté (Figure 4-53) a été faite. Les détails des calculs figurent dans la publication en annexe (Monjoie, Schroeder et al., 1985b).

Le résultat final est que le coefficient de perméabilité calculé par l'interprétation oedométrique est de $2.1 \cdot 10^{-5}$ mD. Cette valeur est d'un tout autre ordre de grandeur que la valeur réelle de la perméabilité des craies (de l'ordre de 0.1 mD à 2 mD).

Le mécanisme de fluage de la craie n'est donc pas une dissipation des surpressions interstitielles⁵⁵. Il n'est sans doute pas non plus une déformation interne (par glissement des systèmes cristallins) de la calcite des grains et est plus vraisemblablement un glissement entre les constituants de la matrice crayeuse.

Ses causes et ses mécanismes restent encore à déterminer mais l'hypothèse de dissolutions - recristallisation sous contraintes est une possibilité intéressante qui sera discutée au § 4.11.

⁵⁴ méthode graphique, du logarithme ou de la racine carrée.

⁵⁵ le mode opératoire a d'ailleurs été choisi pour éviter ces surpressions (voir note infrapaginale n°43 au § 4.7.1. et annexe) mais la notion de "consolidation" étant assez bien ancrée, seul une démonstration par calcul pouvait être irréfutable.

4.10 Comportements spécifiques

Outre son comportement mécanique, déjà assez particulier, qui vient d'être décrit, la craie présente quelques particularités dont l'une, l'effritement, apporte des éléments de réflexion sur la ou les nature(s) des liaisons interparticulaires. L'autre, l'extrusion, a de lourdes conséquences économiques.

4.10.1 Extrusion

La "production de craie" est un des problèmes importants posés aux "reservoir engineers" (Andersen, 1995). Parfois, en fonction des conditions de dépression entre le réservoir et le puits, de la craie envahit le puits de production et le colmate.

Dans la nature, il a été observé (Hutchinson⁵⁶), que des blocs de craie tombant d'une falaise, se liquéfiaient littéralement. Des essais non drainés (Leddra & Jones, 1989), ont confirmé la réponse nette de la pression interstitielle de la craie en conditions non drainées, conduisant à une rupture analogue à celle des sols dans les conditions du "critical state", ce qui se voit très bien sur le diagramme (Figure 4-54) relatif à des essais sur craies de Stevn's Klint saturées en eau. À la rupture "critique", la craie montre un affaiblissement et une instabilité qui conduisent à de grandes déformations instantanées.

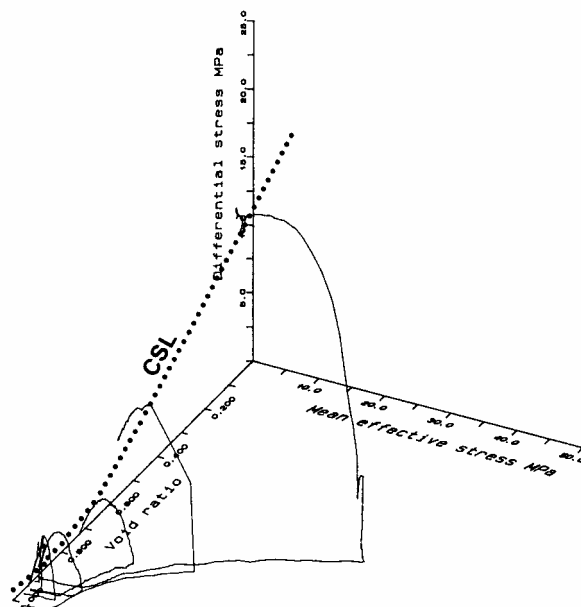


Figure 4-54 : Essais de compression isotropes, non drainés, sur craies de Stevn's Klint saturées en eau. Diagramme $p' - q - e$ (indice des vides). (CSL = critical state line) (Leddra & Jones, 1989)

Ce phénomène pourrait être appelé "liquéfaction statique" mais ne reproduit pas exactement le phénomène d'extrusion tel qu'il se rencontre dans les puits pétroliers

⁵⁶ personal communication to Mervyn Jones, 1988.

Expérimentalement, la "liquéfaction" de la craie proprement dite, a été mise en évidence dès 1990 (Risnes, 1990). Pour cela, des essais de compression hydrostatique ou oedométrique ont été effectués sur des craies saturées en différents fluides. La particularité de l'essai est que le support inférieur de l'échantillon est percé d'une ouverture, de 2 mm à 10 mm de diamètre, comme indiqué sur le schéma du dispositif expérimental pour les essais oedométriques (Figure 4-55).

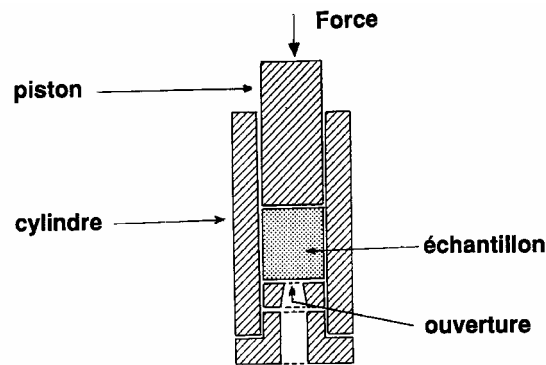


Figure 4-55 : Essais d'extrusion - dispositif expérimental pour essais oedométriques (d'après Risnes, 1990)

La mise en charge de l'éprouvette est faite à vitesse constante (10^{-3} MPa/s) jusqu'à ce que la craie se mette à "couler" à travers l'ouverture, comme de la pâte dentifrice (Photo 5-4).

La contrainte nécessaire pour obtenir l'extrusion est bien supérieure à celle du "pore collapse", comme le montrent les diagrammes contraintes - déformations (Figure 4-56) relatifs à de la craie de Lixhe saturée en eau, soumise à essai d'extrusion, en chargement isotrope, avec ouvertures de 2, 5 et 10 mm et, pour la comparaison, sans ouverture.

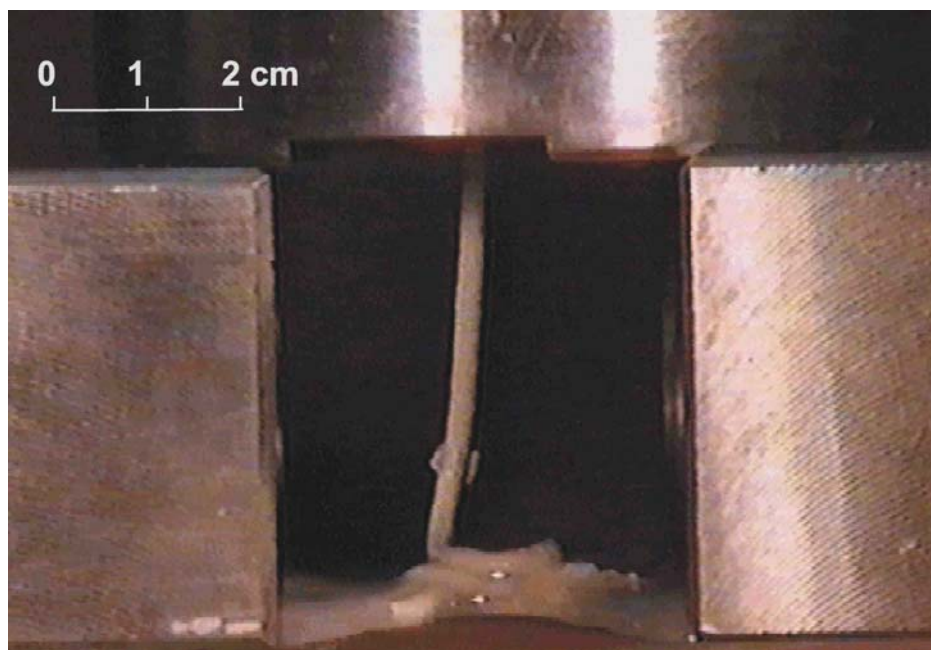


Photo 4-4 : Extrusion de la craie

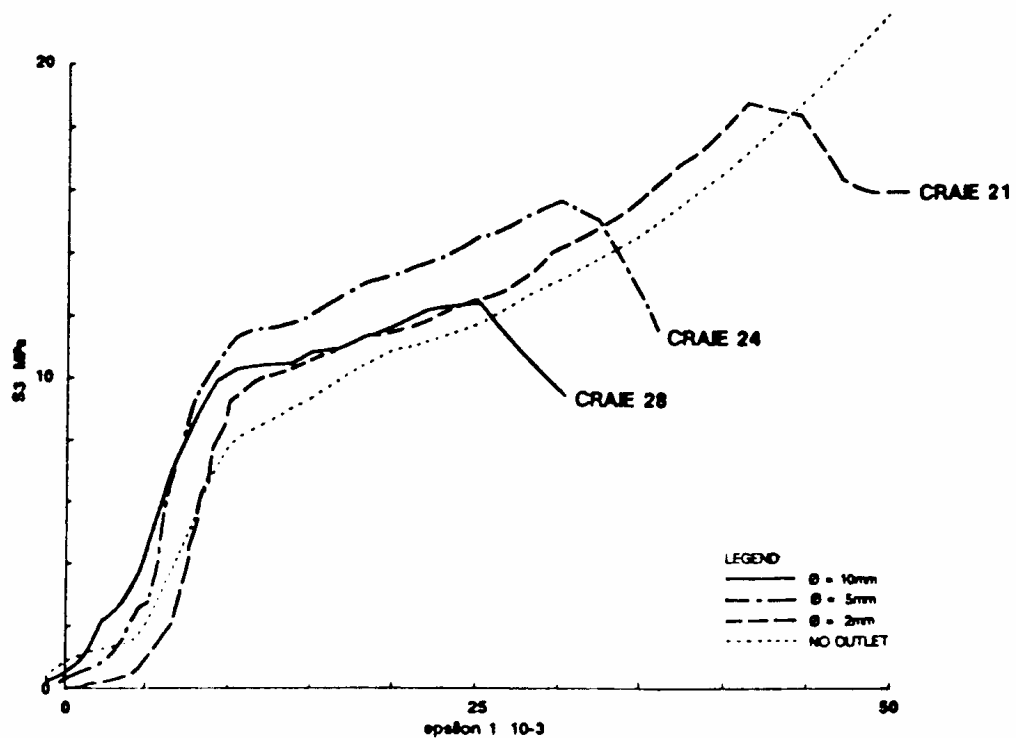


Figure 4-56 : Diagramme contrainte - déformation au cours d'essais hydrostatiques d'extrusion sur craie de Lixhe saturée en eau.

Diamètres des ouvertures : craie 28 : 10 mm; craie 24 : 5 mm; craie 21: 2mm; en pointillés : pas d'ouverture (Risnes, 1990)

La valeur du "pore collapse" est de l'ordre de 7 à 10 MPa, ce qui est assez normal pour une craie de 43% de porosité saturée à l'eau mais il faut aller jusqu'à près de 20 MPa pour obtenir l'extrusion, caractérisée par une augmentation de la déformation accompagnée d'une diminution de la contrainte (suite à l'expulsion de matière). La contrainte d'extrusion est clairement en relation avec la taille de l'ouverture : plus celle-ci est petite, plus importante la contrainte d'extrusion.

Au cours de cette extrusion, la craie extrudée provient de la zone de l'échantillon proche de l'ouverture.

Après l'essai (avec expulsion de 10 à 20 % du volume de l'échantillon), l'échantillon ne montre aucune autre particularité qu'un raccourcissement et si il est séché puis testé en compression simple, sa résistance est encore de l'ordre de 0.1 à 0.2 fois celle d'une craie sèche intacte⁵⁷.

Le niveau de contraintes à l'extrusion dépend du diamètre de l'ouverture, de la vitesse de mise en charge et, bien entendu, de la nature de la craie. Il dépend aussi du fluide de saturation. C'est ainsi qu'il a été montré (Grønås & Risnes, 1982) que l'utilisation d'un mélange de méthanol et d'eau augmentait la contrainte d'extrusion en fonction de la teneur en méthanol. La relation est assez nette (Figure 4-57).

⁵⁷ Résultats d'essais divers réalisés aux LGIH.

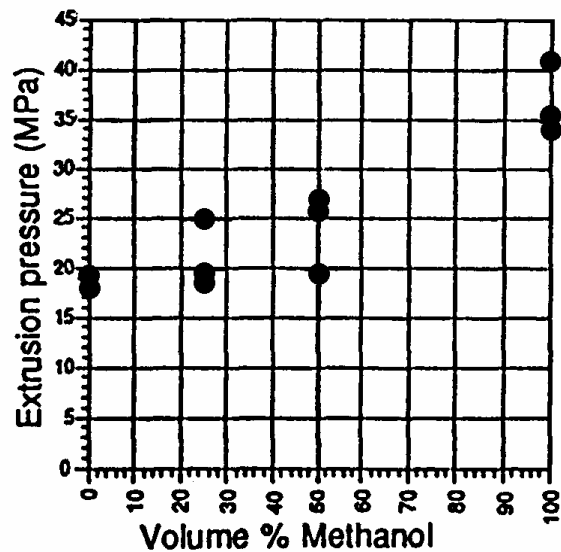


Figure 4-57 : Essais sur craie de Lixhe saturées avec différents mélanges eau / méthanol. Contraintes d'extrusion en fonction de la teneur en méthanol (d'après Grønås & Risnes, 1982)

Cette relation avec la teneur en méthanol pose de nouvelles questions sur le mécanisme de l'action du fluide saturant sur le comportement de la craie.

4.10.2 Effritement

Lorsqu'elle est sèche (séchage à 105°C, jusqu'à poids constant), la craie ayant subi une déformation de 20% lors du test d'extrusion (ou lors d'une compression drainée) possède encore une résistance appréciable. Néanmoins, certaines de ses liaisons (ou certains constituants de sa cohésion) sont rompues suite à cette déformation.

Cet affaiblissement a été mis en évidence en 1990 (Bukkholm, 1990) et a été étudié plus en détails par la suite. Il est illustré par les photos 5-5 et 5-6

Ces photos concernent deux échantillons de craie de Lixhe, l'un intact, l'autre ayant subi un raccourcissement de 20% en conditions oedométriques puis ayant été séché. Les deux échantillons, secs, sont recouverts d'eau. L'échantillon déformé s'effrite rapidement et est complètement désagrégé au bout d'une dizaine de minutes tandis que l'échantillon intact ne présente aucun signe de transformation.



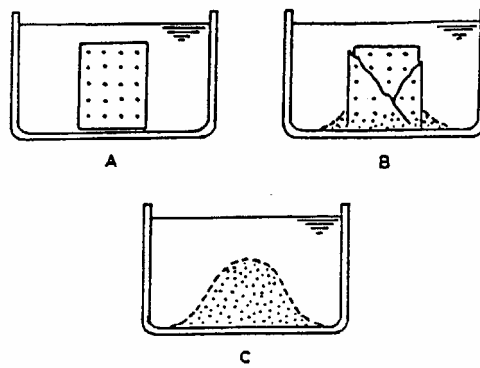
*Photo 4-5 : Echantillons de craie de Lixhe immergés dans de l'eau : à gauche, échantillon intact - à droite échantillon ayant subi une déformation de 20%.
Etat initial*



*Photo 4-6 : Echantillons de craie de Lixhe immergés dans de l'eau : à gauche, échantillon intact - à droite échantillon ayant subi une déformation de 20%.
Etat au bout de 10 minutes.*

Le degré de désagrégation en fonction de la déformation pré-subie a été quantifié (Risnes et al, 1994) grâce à un ensemble d'essais triaxiaux menés jusqu'à diverses valeurs de la déformation axiale. Les différents états possibles en fonction du degré de déformation sont schématisés au ci-dessous (Figure 4-58).

On voit clairement l'évolution du matériau avec un accroissement du nombre de liaisons rompues. Aux faibles niveaux de déformation, les liaisons rompues sont localisées en une seule ou en quelques bandes de cisaillement. Le nombre de bandes de cisaillement augmente au fur et à mesure que croît le degré de déformation et finalement, le matériau est complètement désagrégé.



Déformation %	Temps de réaction minutes	Quantité désagrégée %	Remarques
0.0	-	0	pas de réaction
0.3	20	10	échantillon reste en une seule pièce
0.6	16	25	un peu plus de craie désagrégée
0.7	15	30	idem et rupture en plusieurs pièces
1.3	12	40	pièces plus petites, quantité désagrégée plus grande
2.4	8	60	pièces de 15 mm de dimension
2.7	5	65	dimensions réduites à 10 mm
5.5	3.5	75	quelques pièces de 5 mm, le reste désagrégé
6.6	3	80	quelques pièces de 5 mm, le reste désagrégé

Figure 4-58 : Etats de désagrégation de craies de Lixhe en fonction de la déformation subie préalablement. (d'après Risnes et al., 1994)
 A: déf = 0 à 0.3%; B: déf = 0.6 à 1.3%; C: déf >2.7%

La rupture des liaisons débute donc par localisation en bandes de cisaillement.

D'autre part, Risnes (Risnes et al, 1994) a montré que lorsque la resaturation se passe sous vide, il n'y a pas de désagrégation. Ceci le conduit à l'attribuer aux surpressions d'air provoquées par la pénétration de l'eau sous l'effet des forces capillaires. Il est un fait que lors de la désagrégation, on voit l'air s'échapper sous forme de bulles (en passant vraisemblablement par les microfissures), ce qui n'est pas observé pour des échantillons intacts.

Le reliquat de résistance après déformation ne peut donc être du uniquement à des forces capillaires. Il doit subsister quelques liaisons intergranulaires, d'une autre nature. Il serait intéressant de mesurer la résistance des craies ainsi resaturées. Le phénomène d'effritement montre ainsi que d'autres types de liaison que les forces capillaires doivent jouer un rôle dans les forces de liaison intergranulaires.

Les questions posées par l'extrusion et l'effritement seront discutées au chapitre suivant.

4.11 Discussion sur les forces de liaisons interparticulaires et sur les interactions fluides -squelette

Différents facteurs pouvant influencer le comportement mécanique de la craie ont été analysés.

Cependant, la nature des forces de liaisons interparticulaires n'apparaît pas clairement et il semble se confirmer que les liaisons sont de natures multiples, toutes pouvant expliquer, simultanément ou à tour de rôle, tel ou tel comportement.

Les liaisons peuvent être de nature minéralogique "ponts de calcite". Ces "soudures", après phénomènes de dissolution - recristallisation sous contrainte doivent nécessairement exister même si leur visualisation au microscope électronique à balayage ne semble pas encore une évidence. Des études théoriques et des travaux expérimentaux sur la craie ont montré que la dissolution - recristallisation est une réalité connue et mesurable (Djebbi, 1984, Hellmann et al. , à paraître).

La dissolution de la calcite en solution aqueuse est fonction de la vitesse de transfert par convection du matériau dissout. Elle est affectée par le pH, les impuretés chimiques, la pression partielle de CO₂ et l'état de contraintes (une partie chargée étant plus soluble qu'une partie non chargée). Ce dernier facteur semble particulièrement important pour la craie et on pourrait trouver là l'explication (ou du moins une partie) du phénomène de fluage.

Ce phénomène pourrait aussi appuyer certaines théories (Foged et al., 1996) qui relie l'effet du waterflooding à la reprise (ou à l'accroissement) du fluage, le flux d'eau augmentant la dissolution sous contraintes.

Les liaisons intergranulaires peuvent aussi être de nature physico-chimique, en particulier si l'on considère les forces de liaison résultant de la présence de particules argileuses (même dans une craie extrêmement pure comme la craie de Lixhe, il y a encore une fraction de pourcent d'argile).

Les liaisons peuvent également être de nature "capillaire", en particulier avec l'action des ménisques d'eau résiduelle⁵⁸. Ces forces "capillaires" sont fortement dépendantes des phénomènes de mouillabilité. Les forces capillaires ont conduit à étudier la craie dans l'optique des sols insaturés et à introduire la notion de succion, initialement définie comme une énergie potentielle et qui n'est donc pas limitée aux seules forces capillaires des ménisques.

Enfin, une partie de la résistance au cisaillement (par frottement interne) de la craie résulte sans doute d'un mécanisme classique des milieux granulaires, les faibles dimensions des grains et la forte porosité pouvant expliquer le peu de dilatance⁵⁹ observé.

⁵⁸ Par leur genèse marine, toutes les craies renferment encore, après migration de l'huile, une plus ou moins grande quantité d'eau résiduelle. La succion, nulle à l'origine, augmente lors de cette migration (Delage et al., 1996).

⁵⁹ En fait, il existe trop peu de mesures fiables pour pouvoir se prononcer à ce sujet. (faibles déformations et peu d'essais purement déviatoriques)

L'ensemble de ces phénomènes a conduit divers auteurs (Bois, 2000, Risnes & Flaagend, 1999) à définir des modèles conceptuels pour expliquer le comportement de la craie, notamment lors du waterflooding.

Le modèle conceptuel de Bois est schématisé ci-dessous (Figure 4-59).

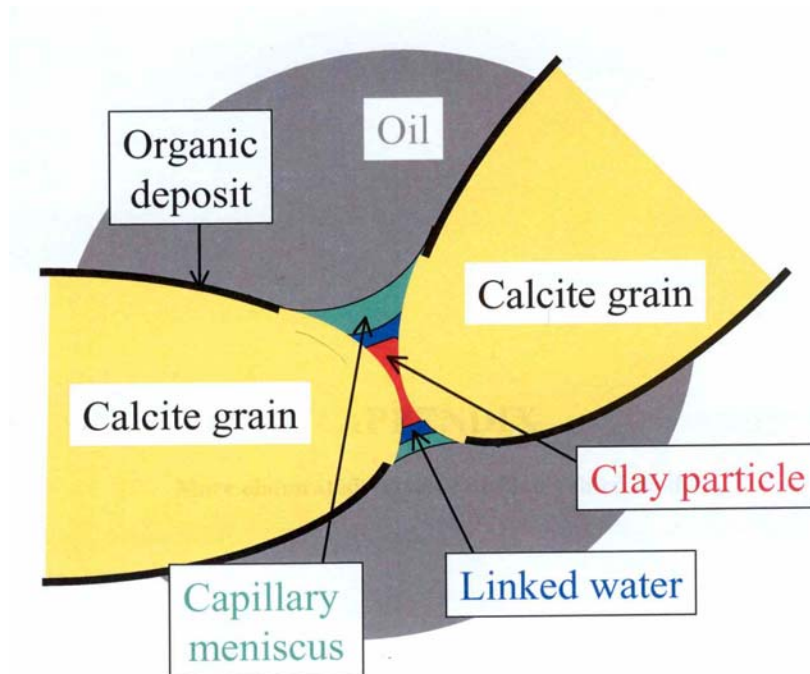


Figure 4-59 : modèle conceptuel des forces de liaison interparticulaire (d'après Bois, 2000)

Dans ce modèle, les grains de calcite ne sont pas complètement en contact mais sont séparés par des particules argileuses qui renferment les soudures par cristallisation de calcite (ce qui serait une explication au fait qu'au M.E.B., on ne voit pratiquement pas ces soudures). Ces impuretés argileuses sont couvertes par une fine couche d'eau, d'abord fortement liée puis de moins en moins jusqu'à l'eau des ménisques. L'huile remplit les pores et tapisse la surface des grains d'une fine pellicule comme il a été vu au § 2.5.4.2 sur la mouillabilité (Baldwin, 1985).

Ce modèle explique les seuils de degré de saturation en eau qui ont été définis plus haut :

- au delà de 20% de saturation en eau, les forces capillaires sont négligeables;
- entre 0.1% et 20%, elles sont importantes et se superposent aux liaisons physico-chimiques;
- en dessous de 0.1%, l'accroissement de résistance n'est plus dû à une augmentation des forces capillaires mais à d'autres mécanismes physiques, comme la perte en eau relative des particules argileuses.

Le modèle conceptuel de Risnes a été établi initialement pour expliquer le comportement de la craie lors d'essais de traction et lors des saturations par mélanges eau / méthanol (Risnes & Flångeng, 1999).

Ce modèle considère une surface de contact intergranulaire complexe, de forme irrégulière, avec quelques aspérités sur lesquelles sont localisées les soudures ("bonds", "spot-welding") dont l'existence est mise, indirectement, en évidence par les essais d'effritement.

Ces cimentations conditionnent en premier la résistance en traction. Pour expliquer les différences de résistance en traction entre les craies saturées à l'eau et au méthanol, ce modèle suppose que les forces capillaires n'agissent pas en traction (ce qui n'est pas évident) et que donc les mécanismes peuvent être soit un affaiblissement, dû à l'eau, des soudures intergranulaires (peu vraisemblable en raison de la rapidité de l'action de l'eau), soit à l'apparition de *forces de répulsions*, de nature électrostatique, entre grains, induites par l'eau⁶⁰.

L'effet de l'eau se marque donc par l'action combinée des forces de répulsion électrostatiques et des forces d'attraction capillaires, lorsque la craie n'est pas complètement saturés. Ce schéma est présenté ci-dessous (Figure 4-60)

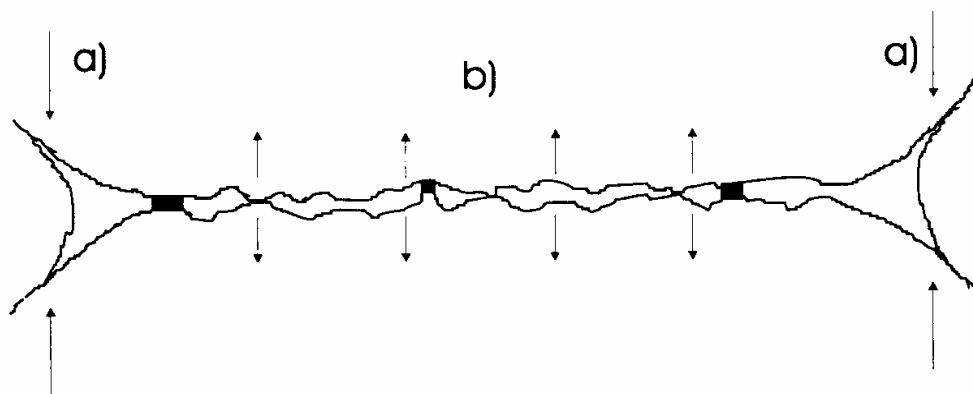


Figure 4-60 : Modèle de Risnes Les points noirs représentent les aspérités en contact qui ont été cimentées - a) forces d'attraction dues aux effets capillaires, b) forces de répulsion, d'origine électrostatique - (Risnes & Flångeng, 1999)

Ce modèle est capable d'expliquer l'évolution des résistances en fonction de la nature du fluide saturant. En traction, les forces de répulsion s'ajoutent aux contraintes imposées, en compression, la traction induite par les forces de répulsion favorisent la rupture par cisaillement des soudures et diminuent la "contrainte" effective entre les contacts intergranulaires.

La quantification des forces électrostatiques de répulsion devra être précisée, en fonction de la nature des fluides interstitiels.

⁶⁰ La surface de la calcite peut acquérir une charge électrique en association avec les ions du fluide et créer ainsi une double couche, le signe de cette charge de surface dépendant du pH de la solution. D'un autre côté, en raison du caractère polaire des molécules d'eau, celles-ci peuvent être adsorbées à la surface de la calcite, créant une couche polarisée (Milter, 1996).

Les concepts ci-dessus permettent aussi de mieux comprendre les influences des autres facteurs, porosité et teneur en silice.

Pour la porosité, les soudures ("spot-welding") sont d'autant plus importantes que la diagenèse est poussée et, par conséquent, que la porosité est réduite. De même l'engrènement responsable d'une partie du frottement interne, est augmenté. Les dimensions des pores étant plus petites, les effets de type "capillarité" sont plus marqués.

La silice (répartie d'une manière diffuse et non sous forme de grains de quartz localisés) peut avoir un effet sur la solubilité de la calcite à laquelle elle est associée et favoriser la formation de ces soudures. Elle modifie aussi vraisemblablement la mouillabilité des grains de craie et, partant, les phénomènes associés à la capillarité.

En conclusion, l'ensemble des phénomènes est évidemment complexe et il serait illusoire d'en privilégier l'un ou l'autre. Les interactions sont certaines et en particulier, le problème du fluage peut être étudié plus avant en le couplant aux effets du waterflooding.

Néanmoins, il reste à expliquer un certain nombre de phénomènes qui ne sont pas, semble-t-il, susceptibles de rentrer dans les modèles conceptuels décrits plus haut. Il s'agit, entre autres, de la constance de la déformation à la rupture en compression simple, du non-effritement lorsque les échantillons déformés sont resaturés sous vide, de l'écrouissage, dont les effets vont bien au delà de la simple diminution de porosité, et, bien entendu, du fluage.

Pour la modélisation, la notion de succion, en fait, englobe les différentes facettes des phénomènes capillaires et physico-chimiques et les réunit au sein d'une seule variable. C'est ce qui fait son grand intérêt en modélisation.

Dans tous les cas, la diversité des causes et effets doit conduire à une grande prudence dans l'interprétation des essais, surtout s'ils sont réalisés avec des conditions de fluides et de mouillabilités variables.

5 AMELIORATION DE LA RECUPERATION DU PETROLE ET REDUCTION DE L'EFFET DE SERRE PAR INJECTION DE CO₂

Aux chapitres précédents, il a été vu combien l'injection d'eau dans le réservoir crayeux, bien qu'améliorant la récupération de l'huile, a des effets néfastes sur la subsidence. Par ailleurs, du point de vue écologique, les accords de Kyoto visent à stabiliser la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.

L'idée de base est qu'il est possible de réduire, voire de supprimer, l'émission du CO₂ dans l'atmosphère en le capturant au cours du cycle de production d'énergie et en le réinjectant dans le sous-sol et notamment dans les réservoirs pétroliers, en lieu et place de l'eau de mer, de manière à récupérer davantage de pétrole et à limiter la subsidence.

Actuellement, le stockage définitif de CO₂ en formations géologiques se pratique surtout dans des aquifères, bien que des injections de CO₂ soit expérimentées en réservoirs pétroliers. Cependant, il n'y a pas de tentatives d'injection en réservoir crayeux en raison, entre autres, de la crainte de phénomènes de dissolution.

La démarche globale est donc la suivante:

- production de CO₂ dans une centrale "à émission (quasi) nulle" et "capture" de ce CO₂
- utilisation du CO₂ capturé pour la récupération du pétrole
- stockage définitif du CO₂ dans le réservoir

Pour que l'opération soit possible, il faut évidemment s'assurer que les propriétés mécaniques de la craie ne sont pas affectées par le balayage par du CO₂ supercritique, comme elles sont affectées par le balayage à l'eau, et que la récupération du pétrole est supérieure à celle obtenue par le balayage à l'eau. Cet aspect est étudié expérimentalement aux LGIH.

L'aspect thermodynamique du problème sort du cadre de ce mémoire. Tous les détails figurent dans la publication en annexe (Schroeder et al., 2001).

Disons simplement que pour les centrales thermiques à combustible fossile, la difficulté pour éviter le rejet de CO₂ dans l'atmosphère, est de le séparer des gaz de combustion (azote, air, eau...). Les processus actuels (décarbonisation des fumées) sont coûteux et délicats.

Le cycle original, Cycle Matiant⁶¹ utilise le CO₂ lui-même comme *fluide de travail* en lieu et place de l'azote de l'air.

⁶¹ du nom de ses inventeurs les prof. Mathieu (ULg) et Iantovski.

Le combustible fossile est brûlé avec de l'oxygène pur produit dans une unité de séparation d'air⁶². Les produits de la combustion, principalement CO₂ et H₂O, sont alors extraits du fluide de travail. L'eau est retirée par simple refroidissement et condensation alors que le CO₂ excédentaire (issu de la combustion, environ 8% du flux recirculé) est extrait du CO₂ pur. Ceci est aisé à faire, à l'aide d'une simple vanne, ce qui permet d'éviter l'utilisation de systèmes de capture coûteux et gros consommateurs de chaleur comme les systèmes à absorption chimique.

De plus, la capture du CO₂ est ici de près de 100% (une petite quantité est toutefois dissoute dans l'eau extraite) au lieu de 90% dans les autres systèmes. Le CO₂ capturé est extrait à l'état liquide ou *supercritique*⁶³ (8 -11 MPa, 15 - 30°C).

Des études physico-chimiques (voir publication Schroeder et al., 2001 en annexe) ont montré que pour la récupération de pétrole de Mer du Nord, le CO₂ à l'état supercritique convient parfaitement.

Le CO₂ supercritique injecté dans le réservoir pétrolier agit d'abord, comme l'eau, par effet "piston". Ensuite, le dioxyde de carbone se dissout en partie dans le pétrole, provoquant, entre autre, une réduction de sa viscosité. Ces deux phénomènes améliorent la récupération du pétrole. Les composants légers du pétrole se dissolvent également en partie dans le dioxyde de carbone.

Lors de l'injection du CO₂, celui-ci déplace et dissout à la fois le pétrole qui est en contact proche avec lui. En fonction du taux de récupération du pétrole souhaité, on est amené à traiter le flux sortant du réservoir, c'est-à-dire à séparer le CO₂ du pétrole, et à le réinjecter dans le puits. Au bout du processus, après récupération du pétrole, le CO₂ est *stocké définitivement dans le réservoir* (on utilise le terme "séquestré").

Du point de vue du "réservoir crayeux", une étude expérimentale a été réalisée dans le but de vérifier si le comportement mécanique de la craie est affecté par l'injection de CO₂ comme il est affecté par l'injection d'eau et de quantifier la récupération de pétrole par le balayage au CO₂ supercritique

A cet effet, une campagne d'essais d'injection de CO₂ a été réalisée aux LGIH sur des craies d'affleurement saturées en Soltrol, en pétrole brut de Mer du Nord et en eau en équilibre chimique avec la craie.

Le dispositif expérimental a du être adapté pour l'utilisation de CO₂ supercritique. A l'amont de l'échantillon, le CO₂ est mis en pression dans des accumulateurs hydropneumatiques capables de tenir des pressions de 33 et 55 MPa.

⁶² la production d'oxygène a un coût important mais qui est toutefois inférieur à celui de la décarbonisation des fumées, ce qui fait que rien que du point de vue environnemental, le processus est viable.

⁶³ dans cet état, il n'y a plus de changement de phase et le fluide, même dense, se comporte toujours comme un gaz

Le CO₂ est porté à l'état supercritique par chauffage à plus de 32°C. Pour ce faire, une enceinte isolante, chauffée à 35°C, entoure l'ensemble du dispositif expérimental. À l'aval, le CO₂ sort de l'échantillon, traverse une cellule en saphir permettant de visualiser le flux puis est recueilli dans une chambre sous pression ou, selon les types d'essais, mis à l'atmosphère.

La procédure d'essai est la suivante:

L'échantillon de craie est saturé sous vide par le fluide voulu et porté à une contrainte isotrope juste inférieure au seuil de "pore collapse". Conformément à ce qui a été indiqué plus haut, cette contrainte dépend du fluide de saturation. (10 MPa pour les échantillons saturés en eau et 16 MPa pour ceux saturés en huile). Sous cette contrainte, le CO₂ supercritique est injecté entre des pressions d'entrée et de sortie de la cellule ("amont" et "aval") initiales valant respectivement de l'ordre de 10 MPa et 8 MPa (ces valeurs étant variables d'un échantillon à l'autre). Le débit de gaz est calculé à partir de l'évolution des pressions dans les réservoirs amont et aval. La perméabilité intrinsèque en est déduite. À la fin de l'essai, l'échantillon est extrait de la cellule et pesé pour déterminer la quantité de fluide balayé par le CO₂.

Enfin, pour déterminer si les caractéristiques mécaniques de l'échantillon ont subi des modifications suite au balayage par le CO₂, l'échantillon testé est *ensuite, en deuxième phase*, resaturé dans le fluide initial, replacé dans la cellule et chargé sous contrainte isotrope jusqu'à dépasser le "pore collapse".

En plus de cette procédure, un essai de plus longue durée a été réalisé sur un échantillon saturé en eau pour étudier l'éventuelle dissolution par le CO₂ de la craie humide⁶⁴. Il a consisté à injecter un flux de CO₂ dans l'échantillon, à le laisser en contact de l'échantillon sous 6 MPa et 35°C, durant 1 semaine et à surveiller l'évolution de la déformation.

Les principaux résultats de ces essais peuvent être résumés comme suit.

- aucune déformation additionnelle ne se produit lors de l'injection de CO₂. Les déformations observées au cours de l'injection sont uniquement dues à la variation de pression interstitielle qui provoque des variations de contraintes effectives (au sens large puisqu'on a affaire à un milieu fluide biphasique) et non à un effet de "pore collapse";
- les essais de "deuxième phase" ont montré que les matériaux, après injection du CO₂ ont un seuil de plasticité ("pore collapse") au moins égal, voire supérieur à celui des matériaux n'ayant pas été lessivés. Les diagrammes contraintes/déformations avant et après injection de CO₂ pour les trois types de fluides saturants : eau, Soltrol et pétrole brut de Mer du Nord sont présentés ci-après (Figure 5-1).

⁶⁴ Rappelons que la calcite pure est relativement peu soluble dans l'eau pure, de 13 mg/l à 18°C à 18 mg/l à 100°C (voir par exemple, annexe 4), mais que sa solubilité augmente jusqu'à 1500mg/l si l'eau est saturée en CO₂.

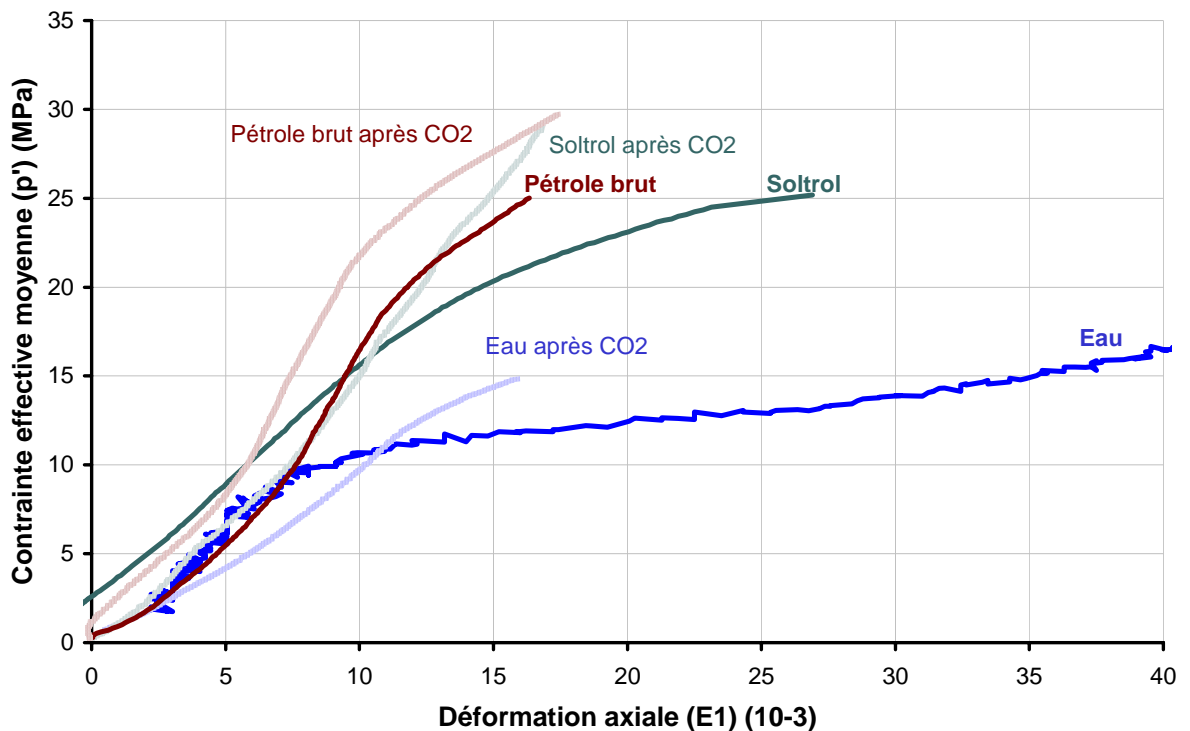


Figure 5-1 : Comparaison entre courbes contrainte - déformation d'échantillons de craie de Lixhe saturés en différents fluides, avant et après injection de CO₂.

L'essai d'injection de longue durée n'a montré aucune déformation additionnelle durant la semaine pendant laquelle le CO₂ a été maintenu en contact avec la craie à sa teneur en eau résiduelle, sous contraintes. Aucun effet de dissolution n'est au stade actuel mis en évidence par cette manipulation. Il semble donc que la dissolution chimique par le CO₂ associé à l'eau résiduelle des éléments de coccolithes n'est pas un phénomène de grande importance. Sans doute, dans la suite de la recherche, faudra-t-il investiguer davantage cet aspect, en considérant la dissolution sous contraintes solide -solide (§ 5.10).

En ce qui concerne la récupération de pétrole, le CO₂ se révèle, comme l'étude théorique l'a montré, nettement plus efficace que l'eau.

Le tableau ci-dessous (Tableau 5-1) donne les évolutions des degrés de saturation en huile (Soltrol), pétrole brut de Mer du Nord et eau avant et après le balayage au CO₂. Il donne aussi les perméabilités mesurées durant le balayage par le CO₂ et permet aussi la comparaison des seuils de plasticité ("pore collapse") des différentes craies testées.

On voit que le lessivage par du CO₂ supercritique augmente considérablement la récupération du pétrole et de l'huile par rapport au balayage par de l'eau, le CO₂ permettant d'atteindre d'environ **85% à 98%** de récupération d'huile alors que le balayage à l'eau ne permet en général qu'une récupération de l'ordre de 70%.

Tableau 5-1 : Résultats des essais d'injection de CO₂ supercritique

Fluide initial	Perméabilité durant injection de CO ₂ mD	Degré de Saturation		"pore collapse"	
		avant injection de CO ₂ %	après injection de CO ₂ %	avant injection de CO ₂ MPa	après injection de CO ₂ MPa
Huile (Soltrol)	0,15	99,6	2	18 à 22	25
Huile (Soltrol)	0,3	98,6	1,4	18 à 22	24
Eau	0,1	98,6	25,5	8 à 11	12,6
Eau	0,04	98,4	7,7	8 à 11	11
Pétrole brut	0,15	97,5	15,2	18 à 22	22,5

Les résultats expérimentaux montrent donc la faisabilité et l'intérêt du processus d'injection de CO₂ dans la craie comme roches réservoir :

- augmentation de près de 20% de la récupération de pétrole;
- pas de diminution de la perméabilité;
- pas de phénomène de dissolution dans les conditions d'essai;
- pas d'altération des propriétés mécaniques de la roche et, partant, pas d'aggravation des phénomènes de compaction - subsidence. Il semblerait, au contraire, que la craie soit renforcée par le passage du CO₂. Ce renforcement n'est pas dû à un écrouissage, comme vu précédemment, puisqu'il n'y a pas eu de passage en phase plastique.

La synergie de la combinaison production d'énergie à émission nulle de CO₂ - récupération assistée de pétrole conduit à gagner dans les trois domaines (Energie, Economie, Environnement) à travers la valorisation d'un déchet, le CO₂.

La récupération supplémentaire de pétrole (estimée à plusieurs centaines de millions de barils) pourrait plus que compenser les coûts associés à l'injection du CO₂ à l'état supercritique, à sa séparation du pétrole et à son stockage définitif.

6 PERSPECTIVES

Les différents problèmes posés par la compréhension et la modélisation (au sens large) du comportement mécanique de la craie, dans l'optique des gisements pétroliers, sont loin d'être complètement résolus, comme il a été vu précédemment.

Parmi les développements futurs, à court ou moyen terme, qui pourront être faits, certains paraissent plus directement accessibles et prometteurs, d'autres, comme par exemple, l'élaboration d'une théorie thermodynamique rendant compte des forces de liaisons intercrystallines, sont envisageables à plus long terme et dans un cadre largement pluridisciplinaire.

D'ici là, plusieurs orientations pourraient être développées avec de raisonnables chances de donner des résultats intéressants.

Sans vouloir être exhaustif, les travaux futurs pourraient, par exemple, porter sur les points suivants.

- l'amélioration de la compréhension des mécanismes au niveau microscopique (développement des modèles conceptuels de Bois et Risnes, établissement de nouveaux modèles), par, entre autres, l'utilisation des nouvelles techniques de visualisation des fluides dans les roches.

A cet effet, le cryo-MEB (microscope électronique à balayage sur échantillons gelés) ou, mieux encore, le MEB environnemental (microscope électronique à balayage travaillant à pression atmosphérique) sont particulièrement bien adaptés. Actuellement, des études de mouillabilité par ces méthodes ont été faites sur des sables et des matériaux reconstitués (Robin et al., 1995; Robin & Degrève, 1997, Dawe & Grattoni, 1998).

Les résultats sont encourageants et on peut envisager d'appliquer les méthodes à la craie, bien que les dimensions des grains des roches étudiées jusqu'à présent soient d'un autre ordre de grandeur que celles des grains de craie et, a fortiori, des contacts intergranulaires, objets des modèles conceptuels;

- extension des études sur les phénomènes de dissolution - recristallisation aux contacts intergranulaires (physico-chimie de la craie);
- le développement des techniques de modification de la mouillabilité. Les méthodes exposées plus haut doivent être appliquées systématiquement et des mesures standard de la mouillabilité faites sur les échantillons traités;
- des mesures systématiques sur des matériaux à mouillabilité variable. Outre des séries d'essais classiques, on peut imaginer des essais plus originaux.

Par exemple, pour mieux cerner le phénomène (sans qu'il y ait d'application concrète en vue), on pourrait envisager de faire du balayage à l'huile d'échantillons de craies mouillables à l'huile, saturées en eau, avec, éventuellement, des degrés variables de saturation initiale en huile.

Observera-t-on une déformation additionnelle? Si oui, les phénomènes capillaires auront une justification supplémentaire, si non, les hypothèses de fluage par dissolution sous contrainte seront confortées.

- investigation systématique des paramètres "de constitution", c'est-à-dire principalement la porosité, l'effet de la teneur en SiO₂ et l'influence des types d'argiles et des possibles modifications de leurs structures cristallines (échanges d'ions, modification de l'espace interfoliaire etc.);
- prise en compte de la morphologie des grains et de la structure de la craie, en relation avec ses conditions de dépôt et de transport dans le bassin sédimentaire;
- étude de l'effet de la température sur différents chemins de contrainte, les résultats actuels ayant montré que la température semblait influencer différemment les réponses des échantillons soumis à contraintes déviatoriques ou volumiques;
- extension de la loi Pasachalk en y implémentant la viscosité et en la rendant multiparamètres (voir ci-dessus), avec pour objectif final, la mise au point de modèles à couplage hydro - thermo - mécaniques applicables aux problèmes de reservoir engineering;
- et bien entendu, la continuation des études sur la capture du CO₂ et sa séquestration en réservoir crayeux après avoir amélioré la récupération du pétrole. Ce dernier aspect sort un peu de l'exploration systématique du comportement mécanique de la craie mais y est étroitement lié et les perspectives qu'il ouvre, tant au point de vue économique qu'environnemental valent la peine de pousser plus loin ces études.

7 CONCLUSION

En guise de conclusion, il faut d'abord constater que le comportement mécanique de la craie est quelque chose très complexe, beaucoup plus complexe en tous cas que ce qu'on pourrait penser à première vue.

La craie "franche" est ainsi un milieu granulaire à forte porosité, non fissuré, composé de grains micrométriques, présentant une cohésion dont l'origine est vraisemblablement de nature physico-chimique, avec sans doute une part de diagenèse, à comportement, "pseudo-elasto" - visco - plastique, avec écrasement et dont les propriétés sont fortement dépendantes de la mouillabilité, c'est-à-dire de l'état de surface des débris de coccolites et du ou des fluides saturants.

Au niveau microscopique, les différents phénomènes entrant en jeu (capillarité, soudures minéralogiques, interactions physico-chimiques, dissolution - recristallisation) jouent simultanément et presque chaque particularité de la craie trouve son explication dans l'intervention de l'un ou l'autre de ces facteurs.

Il n'en demeure pas moins qu'à partir des modèles conceptuels existants, un modèle général unifié serait satisfaisant pour l'esprit, même si au niveau macroscopique, les modélisations, basées sur les résultats expérimentaux, fournissent actuellement des méthodes précises pour la simulation du comportement mécanique de la craie.

En particulier, la loi Pasachalk prend en compte les réponses macroscopiques et intègre les phénomènes d'interaction fluide - squelette. L'ajout de l'aspect visqueux et de la variabilité des paramètres en fonction de la constitution de la craie (porosité, silice, argiles), de la mouillabilité et de la température permettra de disposer d'un outil applicable au reservoir engineering.

Le matériau, d'aspect terne et banal à l'œil nu, s'est ainsi révélé d'une richesse et d'une variété telles que depuis qu'il fait l'objet d'études relativement intensives, soit depuis une trentaine d'années, il continue à apporter son lot de questions nouvelles au fur et à mesure que des réponses sont apportées aux questions précédentes!

Une dernière particularité de ce matériau est que son étude, pluridisciplinaire, met en contact des chercheurs aux motivations très différentes mais qui se retrouvent confrontés à des problèmes connexes et surtout liés entre eux : le sédimentologue apporte au reservoir engineer des informations capitales, le mécanicien permet au tectonicien d'expliquer la structure mise en évidence... sans oublier l'apport du géochimiste, des pétrophysiciens et des autres.

Ceci impose un effort permanent de compréhension des autres disciplines et une volonté de pratiquer un langage commun.

C'est ce dernier aspect, en particulier qui par le renouvellement permanent qu'apportent les différentes disciplines, rend aussi passionnante l'étude de la craie et lui offre des possibilités de développement quasi illimitées.

8 REFERENCES

- Adler P.M., 1994. The method of reconstructed porous media. *Current Topics Phys. Fluids*, 1, pp 277-306
- Alexandrov K.S., Belikov B. P., Ryzova T.V., 1966: Calcul des constantes élastiques des roches d'après leur composition minéralogique. Izv. Akad. Nauk SSSR. Serija Geologiceskaija URSS, n° 2. (en russe)
- Alonso, E. E. Gens, A. & Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40 (3), pp 405-430.
- Andersen, M., Foged, N. & Pedersen H.F, 1992. The Link Between Waterflood-Induced Compaction and Rate Sensitive Behavior in a Weak North Sea Chalk. *Proc. 4th North Sea Chalk Symposium*. Deauville
- Andersen M.A., 1995. Petroleum Research in North Sea. Publ Amoco Norway and RF Rogaland Research . Stavanger
- Anderson, W. G., 1986a. Wettability Litterature Survey - Part 1: Rock/Oil/Brine Interactions and the Effects of Core Handling on Wettability. *Journal of Petroleum Technology*. October 1986, pp 1125-1144
- Anderson, W. G., 1986b. Wettability Litterature Survey - Part 2: Wettability Measurement. *Journal of Petroleum Technology*. November 1986, pp 1246-1262
- Anderson, W. G., 1986c. Wettability Litterature Survey - Part 3: The Effects of Wettability on the Electrical Properties of Porous Media. *Journal of Petroleum Technology*. December 1986, pp 1371-1378
- Anderson, W. G., 1987a. Wettability Litterature Survey - Part 4: Effects of Wettability on Capillary Pressure. *Journal of Petroleum Technology*. October 1987, pp 1283 -1300
- Anderson, W. G., 1987b. Wettability Litterature Survey - Part 5: The Effects of Wettability on Relative Permeability. *Journal of Petroleum Technology*. November 1987, pp 1453 - 1468
- Aubry M.-P., 1974. Remarques sur la systématique des *Nannoconnus* dans la craie. *Cahiers de Micropaléontologie*, Vol 4, 22 p 4 pl. Ed CNRS Paris
- Aubry M.-P., 1975. Recherches sur la nanopetrographie des roches siliceuses. *Bull. Trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Museum du Havre*, Tome LXII, fasc 2. 34 p, 14 pl.
- Baguelin F., 1973. Fondations dans la craie. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.* Spécial V, pp 113-120. Octobre 1973. Paris
- Baldwin B.A., 1985. The use of thermal gravimetric analyses to characterize the amounts of organic material on Ekofisk chalk. *Proc. 2nd North Sea Chalk Symposium*. vol 3, 12 p. Ed JCR II, Stavanger
- Barnichon, J-D., 1998. Finite Element Modelling in Structural and Petroleum Geology. *Thèse de doctorat*, MSM – Université de Liège.
- Bergerat F. & Vandycke S., 1994. Cretaceous and Tertiary fault systems in the Boulonnais and Kent areas: Paleostress analysis and geodynamical implications. *Jour.Soc.Geology of London.*, 151, pp 439-448.
- Bergues J. & Charpentier J.P., 2000. Caractéristiques physiques et mécaniques de la craie du Bassin de Paris. *Bull. Inf. Bassin de Paris*. vol 37, No2, pp 120-124.

- Bignot, G., Aubry M.-P., 1973. Géologie de la craie dans le Bassin Parisien. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch. Spécial V*, pp 11-22. Octobre 1973. Paris
- Bless M.J.M., 1988: Upper Campanian lithofacies and ostracode assemblages in South Limburg and NE Belgium. *The chalk District of the Euregio Meuse-Rhine*. April 1988, pp 57-68. M. Streeel & M.J.M. Bless Editors - Public. Natuurhistorisch Museum Maastricht & Laboratoires de Paléontologie de l'Université de Liège.
- Bless M.J.M. & Streeel M., 1988. Upper Cretaceous Nannofossils and Palynomorphs in South Limurg and Northern Liège : a review. *The chalk District of the Euregio Meuse-Rhine*. April 1988, pp 105-116. M. Streeel & M.J.M. Bless Editors - Public. Natuurhistorisch Museum Maastricht & Laboratoires de Paléontologie de l'Université de Liège.
- Bless M.J.M. & Fernandez-Narvaiza Ch., 1995. Het veranderend landschap in de Euregio Maas-Rhijn. *Annales de la Société géologique de Belgique*, T.118, fascicule 1, 1995 pp 1-93. Liège
- Bois A.P., 2000. Pasachalk Research Project - Evaluation after two years. (rapport interne AmsaTech - non publié).
- Brignoli M., Santarelli F.J. & Righetti, C., 1994: Capillary phenomena in impure chalk. *Proc. EUROCK'94* - pp. 837-843.
- Brych J. & Schroeder Ch., 1979. L'appareil triaxial F.P.Ms - modèle 700/40-1. *4ème Congrès International de la Société Internationale de Mécanique des Roches*, t. 1, pp. 61-63. Montreux.
- Bukholm H.P., 1990. Temperatur og tidseffekter ved deformasjon av kalkbergarter. Travail de fin d'études Rogaland University Center .Stavanger.
- Burnett J.A., 1996. Nannofossils and Upper Cretaceous (sub-)stage boundaries - State of the Art. *Jnal of Nannopl. Research*, 18, pp 23-32.
- Caillet G., Judge N.C., Bramwell N.P. Green M., Adam P. & Meciani L., 1996. Structural History of the Chalk Fields in the Norwegian Central Graben. *5th North Sea Chalk Symposium*, Reims
- Calembert L. , 1956. Le Crétacé supérieur de la hesbaye et du Brabant *Ann. Soc. Géol. De Belgique* T LXXX pp B-129-B-156.
- Camelbeeck, T. & van Eck, T., 1994. The Roer Valley graben earthquake of 13 April 1992 and its seismotectonic setting. *Terra Nova* 6: pp 291-295.
- Carniglia R.C., 1973. Data fitting to new strength - grain size - porosity function for ceramics. *Journ. Amer. Ceram. Soc* 56,(111) P 547
- Charlez Ph., Heugas O. & Shao J.F., 1992. Effect of Temperature on Mechanical Properties of Chalk. *4th North Sea Chalk Symposium*. Deauville
- Charlez Ph., Shao J.F. & Skoczylas F., 1992. Effect of Waterflood on Chalk Compaction. *4th North Sea Chalk Symposium*. Deauville
- Charlier R., 1987. Approche unifiée de quelques problèmes non linéaires de mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis. *Coll. Publ. Fac. SC. Appl.* No 109. 301 p.
- Charlier R. & Radu J.P., 1988. On the constitutive equations of the chalk. *Proc. Numerical Methods in Geomechanics* . Swoboda Ed. pp 509-513. Balkema
- Colbeaux J.P., 1974. Mise en évidence d'une zone de cisaillement Nord-Artois - *C. R. Acad. Sc. Paris*, 278. pp 1159-620
- Collin F., Delage P., Schroeder Ch. & Charlier R., 2000. Geomechanical constitutive modelling of a chalk partly saturated by oil and water Eurock 2000. Aachen
- Costet J. & Sanglerat G., 1969. Cours pratique de Mécanique des Sols. Dunod.

- Coulon M., Schroeder Ch., Gaviglio P., Bergerat F., Dubois C. & Vandycke S., 1999. Transformation of the porous network in chalk close to the normal fault planes provided by capillary and elastic properties. *Poster presented at EUG Congress 1999*
- Craig F.F., 1971. The reservoir Engineering Aspects of Waterflooding. *Monograph Series SPE, TX,3.*
- Christensen W.K., 1988. Upper Cretaceous Belemnites of Europe : state of the art. *The chalk District of the Euregio Meuse-Rhine*. April 1988, pp 5-16. M. Streef & M.J.M. Bless Editors - Public. Natuurhistorisch Museum Maastricht & Laboratoires de Paléontologie de l'Université de Liège.
- Cuisset O., 1980. Propriétés électrocinétiques des particules argileuses. Application de la méthode électrophorétique aux problèmes d'environnement et d'identification des sols. *Rapport de recherche LPC No 96*. Paris
- Dake, L.P., 1978. Fundamentals of Reservoir Engineering. Ed. Elsevier
- Da Silva F., Debande G., Monjoie A., Schroeder Ch. Poot B. & Sarda J.P., 1985. Chalk Research Programme JCRI Final report of Project IV- "Mechanical Properties of Chalks" (rapport interne Petrofina - ULg, non publié)
- Da Silva F., Debande G., Monjoie A., Schroeder Ch. Prignon P. & Yernaux C., 1990. Chalk Research Programme JCRII Final report of Project 1-subprojects 1 and 2 "Mechanical Properties of Chalks" (rapport interne Petrofina - ULg, non publié)
- Dawe R.A. & Grattoni C.A., 1998. The visualization of the pore-scale physics of hydrocarbon recovery from reservoirs. *First Break* 16.11, November 1998, pp 371-386.
- Dejonghe L., 1998. Guide de lecture des cartes géologiques de Wallonie à 1/25000. *Publ. MRW - DGRNE*, 48p, Namur
- Delage P., Schroeder Ch. & Cui Y.J., 1996. Subsidence and Capillary Effects in Chalks. *Symposium International ISRM "Eurock'96"* pp 1291 -1298. Turin
- Delage P. & Cui Y.J., 2000. L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'Ingénieur C301-* 20p Ed. Techniques de l'Ingénieur, Paris
- Dessenne J.-L., 1971. Etude rhéologique et géotechnique de la craie. Thèse de docteur - ingénieur Université I de Grenoble.
- de Waal J.A. & Smits R.M.M., 1985. Prediction of reservoir compaction and surface subsidence : field application of a new model. *SPE* 14214.
- D'Heur M., 1990. Chalk and Petroleum in North-West Europe. *Proc. Int. Chalk Symposium held at Brighton University 4-7 September 1989*. pp 631 - 639. Ed. Thomas Telford, London
- Djebbi M., 1984. Phénomène de dissolution - cristallisation. Etude bibliographique et application au fluage de craie. Thèse de docteur de 3ème Cycle. Université des Sciences et Techniques de Lille.
- Doremus C., 1978. Les craies du nord de la France - Corrélations entre la lithostratigraphie, la microstructure et les propriétés mécaniques. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Techniques de Lille.
- Doremus C. & Henry J.P., 1985. Caractérisation des craies du Nord de la France par porosimétrie au mercure. *Ann. Soc. Géol. Nord*. CIV 49-51 Février 1985.
- Engstrøm F., 1992. Rock Mechanical Properties of Danish North Sea Chalk. *Proc. 3th North Sea Chalk Symp.*, Deauville, France.

- Felder P.J. & Boonen L.G.M., 1988: Gamma-ray measurements of Upper Cretaceous to Pleistocene deposits in South Limburg (SE Netherlands) and northern Liège (NE Belgium). *The chalk District of the Euregio Meuse-Rhine*. April 1988, pp 17-24. M. Streel & M.J.M. Bless Editors - Public. Natuurhistorisch Museum Maastricht & Laboratoires de Paléontologie de l'Université de Liège.
- Foged, N. Christensen, H.F. and Andersen, M.A., 1996, Rock Mechanics and Water Injection. *Proc. 5th North Sea Chalk Symp.*, Reims, France.
- Foged-Christensen H., 1996. Rock mechanics and water injection - waterflooding of chalk. *Proc. 4th North Sea Chalk Symp.*, Reims, France.
- Foged-Christensen H., 2000. Chalk Water interaction - JCR V - Project 8.1 Report - (communication personnelle).
- Fonder G., Radu J.P., Charlier R., Monjoie A. & Schroeder Ch., 1988. Ekofisk - Subsidence - Compaction - Mathematical modelisation - Synthesis report. Rapport interne Université de Liège (MSM-LGIH) - Petrofina.
- Fourmaintraux D. & Tourenq C., 1970: Contribution de la pétrographie à l'étude des propriétés physiques et mécaniques des roches. *1er Congrès A.I.G.I.*, pp. 235-245, Paris.
- Fritsen A., Hampton M., Krabbe H., Jones B., Jutson D., Moe A., Nielsen E.B., Petersen N.W., Riis F., Sawyer D., Sellwood B., Strand T., Øverli P.E. & Øxnevad I., 2000. A Joint Chalk Stratigraphic Framework. *Proc. 5th Chalk Symposium JCR V*, Brighton
- Gaviglio P., Adler, P., Thovert J.F., Vandycke S., Bergerat F., Bekri, S & Lestideau R., 1997. Grain-scale microstructures and physical properties of faulted chalks. *Bull Soc. géol. France*, t 168 No 6, pp 727-739.
- Graue A., Viksund B.G. & Baldwin B.A., avril 1998, Reproducible wettability alteration of low-permeable outcrop chalk, *Phillips Petroleum Company - Reservoir & Production Technology Report 15710*, 13 p
- Greder H.N., Gallato V., Cordelier Ph., Laran D., Munoz V. & d'Abrigeon O., 1997, Forty comparisons of mercury injection data with oil / water capillary pressure measurements by the porous plate technique, *SCA - 9710*
- Greenwood J., Specification of Chalk for highway works. *Proc. Int. Chalk Symposium held at Brighton University 4-7 September 1989*. pp 421-423. Ed. Thomas Telford, London
- Grønås T., 1991. Undersøking an føingsparameteren sin innverknad. Travail de fin d'études Rogaland University Center .Stavanger.
- Grønås T & Risnes R., 1982. Sample saturation and Mechanical Strength. *Proc. 4th North Sea Chalk Symposium*. Deauville.
- Gutierrez M., Hoeg K. & Kolderup U.M., 2000. Chalk-Water Interaction : Mechnisms and modelling. *Proc. 6th North Sea Chalk Symposium*. Brighton (non publié)
- Håkanson E., Bromley R. & Perch-Nielsen K., 1974. Maastrichtian Chalk of North-Wesr Europe - A Pelagic Shelf Sediment. *Int. Association of Sedimentologists Special Publication No 1*. pp 211-233.
- Handbook of Chemistry and Physics, 1968. Table F28. Ed Chemical Rubber Co.

- Hellmann R., Renders P.J.N., Gaviglio P., Gratier J.P., Guiguet R., Békri S. & Adler P., à paraître, The experimental deformation of chalk in aqueous solutions : physico-chemical interactions and porosity reduction by pressure solutions. Submitted for publication in "Water rock interactions, ore deposits and environmental geochemistry : A tribute to David A. Crerar" Special Publication Series . The Geochemical Society (communication personnelle des auteurs).
- Hermansen H., Landa G.H., Sylte J.E. & Thomas L.K., 2000. Experiences after 10 years of waterflooding the Ekofisk Field. Norway. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 26 (2000) 11-18. Elsevier
- Heugas O. & Chaerlez Ph., 1990. Mechanical Effect of Water Injection on Ekofisk Chalk. *Proc. 3rd North Sea Chalk Symposium*. Copenhagen
- Homand S., Shao JF. & Schroeder Ch., 1998. Plastic modelling of compressible porous chalk and effect on water injection. *SPE 47585 - Eurock'98 Vol 2, pp 495-504*, Trondheim
- Hill R., 1952 : The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate. *Proc. Phys. Soc. A*. Vol 65, pp 349-354, London.
- Jones M. E. & Leddra M. J., 1989. Compaction and flow characteristics of porous chalks. *Comité Français de Mécanique des Roches. Journée Craie*. Lille, avril 1989.
- Leddra M. & Jones M., 1989. Steady-state flow during undrained loading of chalk. *Proc. Int. Chalk Symposium held at Brighton University 4-7 September 1989*. pp 245-252. Ed. Thomas Telford, London
- Le Roux A., 1973. Texture et comportement des craies. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch*. Spécial V, pp 49-53. Octobre 1973. Paris
- Li X.L., 1999. Comportement hydromécanique des sols fins : de l'état saturé à l'état non saturé *Thèse de doctorat*, MSM – Université de Liège.
- LGIH-MSM, 1988. Ekofisk Subsidence – Compaction. Mathematical modelisation – Synthesis report – rapport interne inédit.
- Loe N., Mathiesen E., Jones M. & Leddra M., 1992. The Influence of Changes in the Pore Fluid on the One-Dimensional Compaction Behaviour of Chalk. *Proc. 4th North Sea Chalk Symposium*. Deauville
- Lord C.J., Johlman C. L. & Rhett D. W., 1998. Is Capillary Suction a Viable Cohesive Mechanism in Chalk?. *SPE/ISRM 47310 - Proc. Eurock'98 Vol 2, pp 479-485*, Trondheim
- Kennedy W.J., 1985. Sedimentology of the late Cretaceous and early Paleocene chalk group North Sea central graben. *Proc. 2nd North Sea Chalk Symposium*. vol 1, 68 p, 35 pl, 18 fig. Ed JCR II, Stavanger
- Madland M. V., 1999. Capillary effects in high porosity chalk. Travail de fin d'études Rogaland University Center .Stavanger.
- Masson M., 1973. Péetrophysique de la craie. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch*. Spécial V, pp 23-47. Octobre 1973. Paris
- Masson P., Laurent L.J. & D'Heur M., 1980. La géologie de la Mer du Nord. *Hommage à Léon Calémbert*. Ed. G. Thone Liège
- Maury V. & Piau J.M., 1996. Subsidence Induced by Water Injection In Water Sensitive Reservoir Rocks : The Example of Ekofisk. *SPE 36890 - SPE European Petroleum Conference* pp 153 -169. Milan
- Millien A., Pairis J.L. & Sirieys P., Tunnel Trans/Manche, retour d'expérience : géomécanique de la craie. *Tunnels et Ouvrages souterrains* No 141 Mai-Juin 1997 pp183-189
- Milner J., 1996. Improved oil recovery in chalk. *PhD Thesis*. University of Bergen

- Monjoie A., Schroeder Ch., Da Silva F., Debande G., Detiège Cl. & Poot B., 1985a. Characterisation and Inhibition of Chalks. *Proc.2nd North Sea Chalk Symposium*, Stavanger.
- Monjoie A., Schroeder Ch., Halleux L., Da Silva F., Debande G., Detiège Cl. & Poot B., 1985b. Mechanical Behaviour of Chalks. *Proc.2nd North Sea Chalk Symposium*, Stavanger.
- Monjoie A., Schroeder Ch., Delville, G. & Barnich M.P., 1987. Depletion and waterflooding tests on North Sea Chalks. Rapport interne Petrofina - LGIH (non publié).
- Monjoie A. & Schroeder Ch., 1989. Caractéristiques mécaniques de craies du Crétacé supérieur. *Comité Français de Mécanique des Roches. Journée Craie*. Lille, avril 1989. 31 p
- Monjoie A., Schroeder Ch., Prignon P., Yernaux C., Da Silva F. & Debande, G., 1990. Establishment of Constitutive Laws of Chalks and Long Term Tests *Third North Sea Chalk Symposium*. Copenhagen, June 1990.
- Monjoie A., Schroeder Ch. & Da Silva, F., 1991. Testing procedure for time-dependent behaviour of chalk. *7th International Congress on Rock Mechanics*, T1 pp 565-567. Aachen
- Monjoie A. & Schroeder Ch., 1996. Déplacements des hydrocarbures dans la craie. *Colloque "La Craie, Objet Géologique, Réservoir, Matériau Et Paysage"*. Arras
- Monjoie A., Schroeder Ch. & Illing P., 1998. Simecsol - Laboratory tests to study the consequences of water flooding chalk plugs under isotropic stress state- Rapport SMS981 des LGIH (non publié)
- Monjoie A., Schroeder Ch. & Illing P., 1999. Simecsol -Triaxial and water flooding tests on chalk- Rapport SMS982 des LGIH (non publié)
- Monjoie A., Schroeder Ch. & Illing P., 2000. Simecsol - Laboratory tests to study the influence of waterflooding on chalk plugs - drained tests with controlled stress - Rapport SMS2000-01 des LGIH (non publié)
- Mortimore R.N., 1989. Chalk or Kalk? *Proc. Int. Chalk Symposium held at Brighton University 4-7 September 1989*. pp 15-45. Ed. Thomas Telford, London
- Noël D., 1967. Etude des Coccolithes in situ dans les roches. La notion de nannofaciès. *Proc. First. Int. Conf. Plankt. Microf.*, Geneva, vol II, pp 486-491.
- Omalius d'Halloy J. B., 1822. Observation sur un essai de carte géologique de la France, des Pays-bas et des contrées voisines. *Ann Mines (Paris)*, vol 7, pp 353-376.
- Papamichos E., Brignoli M. & Santarelli F.J., 1996. Experiments and Modelling of Partially Saturated Collapsible Rocks. *Proc. 5th North Sea Chalk Symposium*. Reims
- Papamichos E., Brignoli M. & Schei G., 1998. Compaction in Soft Weak Rocks Due to WaterFlooding. *Proc. Eurock'98. SPE/ISRM 47389*, pp411-418. Trondheim.
- Pasachalk, 2001. PASACHALK - Mechanical Behaviour of Partially and Multiphase Saturated CHALKS -Fluid-skeleton Interaction: Main Factor of Chalk Oil Reservoirs Compaction and Related Subsidence -Contract EU n° : JOF3CT970033 Publishable Final Report - Schroeder Ch., Illing P., Charlier R., Collin F., Delage P., Cui Y.-J., De Gennaro V., De Leebeeck A., Keül P. & Bois A.-P. (sous presse)
- Piau J.M. & Maury V., 1994. Mechanical Effects of Water Injection on Chalk Reservoir. *Proc. Eurock'94. SPE/ISRM 28133*, pp819-828. Milan

- Piau J.M. & Maury V., 1995. basic Mechanical modelisation of chamk/water interaction. *1st Int Conf..on Unsaturated Soils* Communication No156. Paris
- Piau J.M., Bois A.P., Atahan C., Maury V. & Hallé G., 1998. Water/Chalk (Or Collapsible Soil) Interaction: Part I. Comprehensive Evaluation of Starin and Sterss Jumps at the Waterfront. *Proc. Eurock'98. SPE/ISRM 47390*, pp419-428. Trondheim.
- Pirard E. & Pierroux A., 1992. Microporosimétrie quantitative de roches et matériaux par analyse d'images. *Annales Soc. Géol. de Belgique* T115 (fasc. 1), pp 245-252
- Renoux, P. & Di Giandomenico S., 2000. Etude diagraphique des deux puits 701 (Poigny) et 702 (Sainte-Colombe). *Bull. Inf. Bassin de Paris*. vol 37, No2, pp 66-73.
- Retth D.W. & Teufel L.W., 1992. Failure Criteria for high porosity North Sea Chalks. *Proc. 4th North Sea Chalk Symposium*. Deauville
- Risnes R., 1990. A Laboratory Study of Chalk Extrusion. *Third North Sea Chalk Symposium*. Copenhaegen.
- Risnes R., Gjesdal S. A., Landaads T.L.& Madland, I., 1994. Changes in Mechanical Properties of Chalk Caused by Deformation and by Pressure SPE/ISRM 28136. *Eurock '94*, Copenhague
- Risnes R. & Kristensen C.N. ,1996. Triaxial Tests on High Porosity Chalk with Différent Saturating Fluids. *5th North Sea Chalk Symp.*, Reims, France
- Risnes R. & Kleppa E., 1996. Plastic behaviour of high porosity chalk in constant K-ratio tests. *5th North Sea Chalk Symp.*, Reims, France
- Risnes R., Garpestad O.J., Gilje M. Oland L.T., Ovesen M. & Vargevik E., 1998. Starin Hardening and Extensional Failure in High Porosity Chalk. *Proc. Eurock'98. SPE/ISRM 47581*, pp475-484. Trondheim.
- Risnes R., Flångeng O., 1999a. Mechanical properties of chalk with emphasis on chalk-fluid interactions and micromechanical aspects. *Oil & Gas Science and technology. Rev IFP*. vol 54 No 6, pp 751-758.
- Risnes R., Korsnes R.I.& Vatne T.A., 1999b. Tensional strength of soft chalks measured in direct and Brazilian tests - *Proc. 9th Int. Congr. ISRM*, pp 667-672 - Paris
- Risnes R. & Nygaard V., 2000. Chalk behaviour in the elastic region. *6th Chalk Symposium JCR V*, Brighton.
- Risnes R., Flångeng O. & Madland M.V., 2000. Some aspects of chalk-fluid interactions. *6th Chalk Symposium JCR V*, Brighton.
- Robaszynski F., 1988. Upper Cretaceous planktonic foraminifera from northern Belgium and the southeastern Netherlands. *The Chalk District of the Euregio Meuse-Rhine*. April 1988, pp 77-83. M. Streeel & M.J.M. Bless Editors - Public. Natuurhistorisch Museum Maastricht & Laboratoires de Paléontologie de l'Université de Liège.
- Robin M., Rosenberg E. & Fassi-Firi O., 1995. Wettability Studies at the Pore Level; A New Approach by Use of Cryo-SEM. *SPE Formation Evaluation, March 1995*, pp11-19.
- Robin M. & Degrève F., 1997. Wettability Of Porous Media Frm Environmental Scanning Electron Microscopy : From Model to Reservoir Rocks. *SPE 37235*.
- Sarda J.P., 1985. Porosity and permeability of chalk samples at reservoir temperature under isotropic loading. *Proc.2nd North Sea Chalk Symposium*, Stavanger.

- Scholle P. A., 1977. Chalk Diagenesis and Its Relation to Petroleum Exploration : Oil from Chalk, a Modern Miracle?. *Bull. Amer. Soc. Petrol. Geologists* V 61, No 7, pp 982 - 1009.
- Schroeder Ch., 1995. Le "pore collapse" : aspect particulier de l'interaction fluide-squelette dans les craies. *Colloque international du Groupement Belge de Mécanique des Roches - Chalk and Shales* pp I.1.53-I.1.60 Bruxelles
- Schroeder, Ch. , Shao J.F., 1996. Plastic Deformations and capillary effects in Chalks. *5th North Sea Chalk Symposium*. Reims
- Schroeder Ch., Corin L. & Monjoie A., 1996. Application de la notion d'indice de continuité à la détermination de la fissuration des massifs rocheux. *Séminaire international sur la Géophysique appliquée au génie civil, à l'eau et à l'environnement..* Casablanca
- Schroeder Ch., Bois A-P. ,Maury V. & Hallé G., 1998. Water/chalk (or collapsible soil) interaction: Part II. Results of tests performed in laboratory on Lixhe chalk to calibrate water/chalk models. *Proc. Eurock'98. SPE/ISRM 47587* Vol 2, pp 505-514, Trondheim
- Schroeder Ch., Bois A.P., Charlier, R., Collin, F., Cui, Y.J., Delage, P., Goulois, A., Illing, P., Noël, F. & Maury, V., 2000. PASAChalk project (partially saturated chalk) : constitutive modeling, determination of parameters using specific stress paths and application to the waterflooding. *6th Chalk Symposium JCR V*, Brighton.
- Schroeder Ch., Cui Y.J. & Schreffler B., 2001a. Subsidence dues à l'extraction de combustibles fossiles. In "*Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine*", sous la direction de P. Delage et B. Schreffler pp 165 -188. Ed Hermès Paris
- Shao, J.-F., Bederiat, M. & Schroeder Ch., 1994. Elasto-visco-plastic modelling of a porous chalk. *Mechanics research Communications, vol 21, n°1*, pp 63-75 Elsevier Science Ltd
- Schroeder Ch., Houyou S., Illing P., Mathieu Ph. & Monjoie A., 2001b. Combination Of Enhanced Oil Recovery And Zero Emission Power Plants. *Proc 11th European Symposium on Improved Oil Recovery - Paper IOR-09*. Amsterdam.
- Shao J.F., 1987. Etude du comportement d'une craie blanche très poreuse et modélisation. Thèse de doctorat - Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres - Artois.
- Shao J.-F., Bederiat M. & Schroeder Ch., 1993. A visco-plastic theory for soft rock behaviour and application. *Proc. Symp. Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks - Athens*. pp 796 -802 Balkema
- Shao J.-F., Bederiat M. & Schroeder Ch., 1994. Elasto-visco-plastic modelling of a porous chalk. *Mechanics research Communications, vol 21, n°1*, pp 63-75 Elsevier Science Ltd
- Smits R.M.M., de Waal J.A., van Kooten J.F.C., 1986. Prediction of abrupt reservoir compaction and surface subsidence due to "pore collapse" in carbonates. SPE 15642.
- Spencer A.M., Leckie G.G. & Chew K.J., 1996. North Sea hydrocarbon plays and their resources. *First Break* Vol. 14 No 9 September 1996 pp345-357.
- Standnes D.C. & Austad T., 2000. Wettability alteration in chalk. 1 Preparation of core material. 2.Mechanism for wettability alteration from oil-wet to water-wet using surfactants. Publication Stavanger College (Norvège) - communication personnelle par R. Risnes.
- Tallon J. P., 1976. Influence de la texture sur certaines propriétés mécaniques des craies franches. Thèse Université P. et M. Curie - Paris VI.

- Teufel L.W., Rhett D. W. & Farrell H.E., 1991. Effect of Reservoir depletion and pore pressure drawdown on insitu stress and deformation in the Ekofisk Field, North Sea. *Rock Mechanics as an Interdisciplinary Science*, Roegiers Ed. pp 63-72. Balkema.
- Tourenq C., Fourmaintraux D.& Denis A., 1971 : Propagation des ondes et discontinuités des roches. *Symp. Soc. Int. Mec. Roches, Conn. I. 1.*, Nancy.
- Vandycke S., 1992 Tectonique cassante et paléo-contraintes dans les formations crétacées du Nord-Ouest européen. Implications géodynamiques. *Mém.Sc.Terre 92-02*, UPMC, Paris, 179 p., 97 fig., 12 tab., 30 pl. photo
- Van Eekelen H.A.M., 1980. Isotropic yield surfaces in three dimensions for use in soil mechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (4), pp. 98-101.
- Van Impe, W.F., Peiffer, H., Mengé, P. & De Weert A., 1999. Determination of Darcy Permeability and Retention Capacity for Two-Phase (Non Reactive) Flow (communication personnelle)
- Wiborg R. & Jewhurst J., 1986. Ekofisk subsidence detailed and solutions assessed. *TECHNOLOGY Feb.17, 1986. Oil & Gas Journal*. pp 47-51

ANNEXES

Liste des annexes

- Annexe 1 - extrait de la légende stratigraphique internationale
- Annexe 2 - porosimétries au mercure haute pression sur craies campaniennes
- Annexe 3 - caractéristiques du Soltrol™
- Annexe 4 - composition de différentes eaux utilisées lors des essais de laboratoire
- Annexe 5 - calcul des surpressions interstitielles lors d'un essai "drainé"
- Annexe 6 - mode opératoire du collage de jauges sur la craie

Annexe 1 : extrait de l'échelle stratigraphique internationale

ERE	SYSTEME	SERIE	ETAGE	age (Ma)
Cénozoïque	Quaternaire	Holocène		0.01
		Pléistocène		1.75
		Pliocène	Plaisancien	5.1
	Zancléen			
	Néogène	Miocène	Messinien	23
			Tortonien	
			Serravalien	
			Langhien	
			Burdigalien	
			Aquitanien	
			Paléogène	
	Rupélien			
	Eocène	Priabonien ⁶⁵		53
		Bartonien		
Lutétien ⁶⁶				
Yprésien				
Paléocène	Thanétien	65		
	Sélandien ⁶⁷			
	Danien ⁶⁸			
Mésozoïque	Sénonien	Maastrichtien	88	
		Campanien		
		Santonien		
	Crétacé		Coniacien	125
			Turonien	
			Cenomanien	
			Albien	
			Aptien	
			Barrémien ⁶⁹	
	Néocomien	Hauterivien	135	
		Valanginien		
Berriassien				

(d'après Dejonghe, 1998)

⁶⁵ anciennement : Tongrien

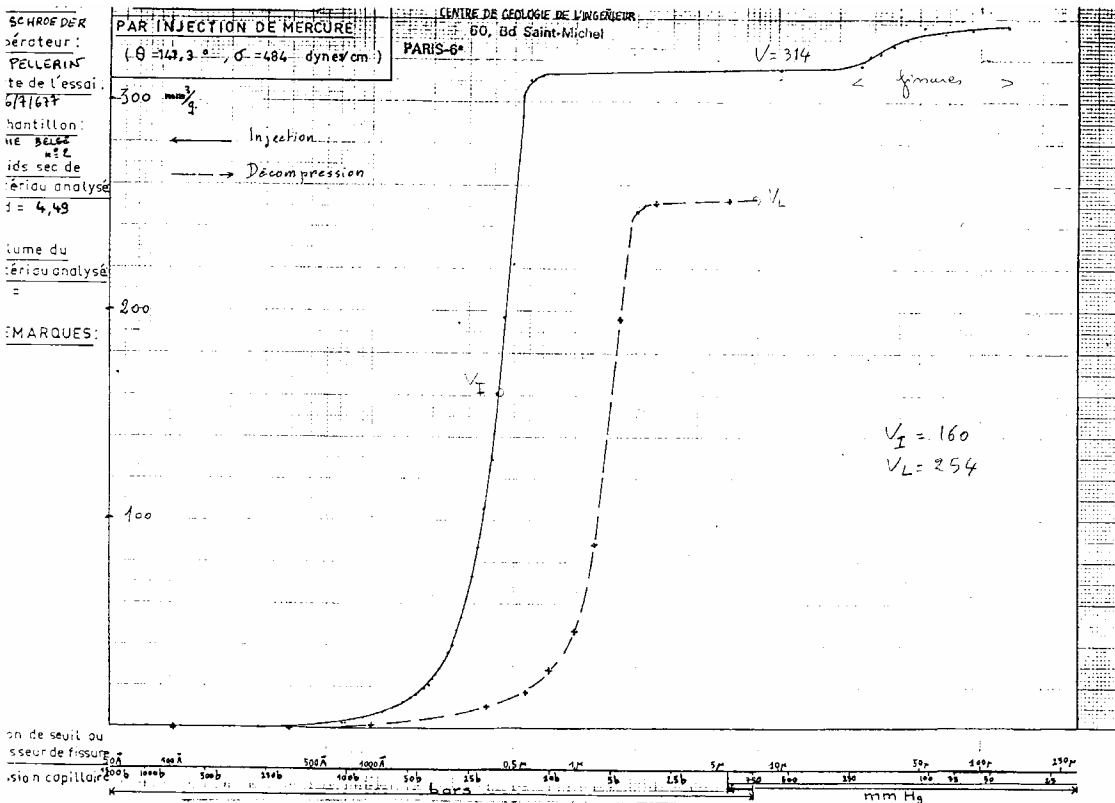
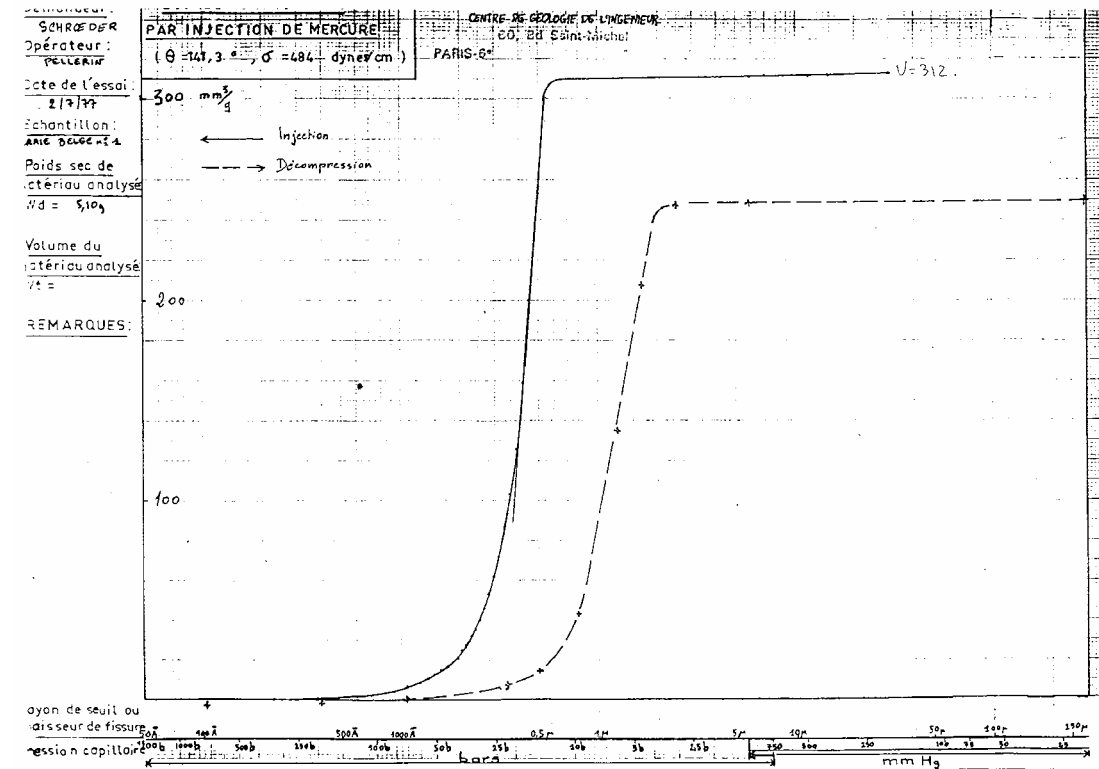
⁶⁶ anciennement : Bruxellien

⁶⁷ Thanétien et Sélandien : anciennement Landénien

⁶⁸ anciennement : Montien

⁶⁹ du Barrémien au Coniacien : anciennement Wealdien

Annexe 2 : porosimétries au mercure haute pression sur craies campaniennes.
 Mesures réalisées en 1977 par M. Pellerin au Centre de Géologie de l'Ingénieur
 de l'Ecole des Mines de Paris (Direction Prof. Arnould)



**Annexe 3 : caractéristiques du Soltrol™
kérosène utilisé comme "huile" de laboratoire
Document PPCo**



PHILLIPS CHEMICAL COMPANY

A DIVISION OF PHILLIPS PETROLEUM COMPANY
BARTLESVILLE, OKLAHOMA 74004
918 681-6600

SPECIALTY CHEMICALS

SOLTROL* 170

Property	Typical Value**	Specification	Test Method
Distillation Range, Deg. F @ 760 mm Hg			ASTM D 86
Initial Boiling Point	434	420 Min.	
10% 50% 90% End Point	438 444 455 472		
Specific Gravity @ 60/60 F	0.78	475 Max.	ASTM D 1298
Density of Liquid @ 60 F, lbs/gal	6.53		ASTM D 1250
Color, Saybolt	+30	+25 Min.	ASTM D 156
Acidity of Distillation Residue	Neutral	Neutral	ASTM D 1093
Sulfur Content, ppm	2		ASTM D 3120
Flash Point, Deg. F	192	175 Min.	ASTM D 56
Aniline Point, Deg. F	196		ASTM D 611
Kauri-Butanol Value	24.6		ASTM D 1133
Bromine No.	0.8		ASTM D 1159
Kinematic Viscosity, cs @ 100 F	2.6		ASTM D 445
Copper Corrosion, 3 hr @ 212 F	1	1 Max.	ASTM D 130
Odor	Pass		Panel

* Denotes Registered Trademark

Notice: Since the conditions of handling and use are beyond our control we make no guarantee of results; nor is any of the above information to be taken as a license to operate under, or recommendation to infringe, any patent.

** Note 1 - The information contained herein is, to the best of our knowledge and belief, accurate, but we assume no liability for damages or penalties resulting from use of or reliance on this information.

API700 -- Reissued on 6/27/97 by BLR

Annexe 4 : composition de diverses eaux (en mg/l)
(Da Silva et al., 1985)

	Water from Liège	Water in chemical equilibrium with North Sea chalk	Sea Water	Waters from North Sea formation		
				Upper Danian	Lower Danian	Maastrichtian
Ca ⁺⁺	167.7	17.4	468.9	9287	15120	743
Mg ⁺⁺	15.1	0.5	1344.5	562	1713	9210
Na ⁺	20.5	29.2	10121	15192	37232	17551
K ⁺	2.3	0.8	-	70	0	63
Fe ⁺⁺⁺	-	0.6	-	-	-	-
SO ₄ ⁻⁻	86.0	16.8	2402.8	-	-	-
HCO ₃ ⁻	342.3	67.1	159.8	421	195	189
Cl ⁻	50.4	28.7	18485.5	41336	89040	55179
SiO ₃ ⁻⁻	19.4	5.3	-	0	0	0

Annexe 5 : calcul des surpressions interstitielles lors d'un essai "drainé"

Détermination de la surpression interstitielle nécessaire au drainage d'un échantillon soumis à déformation uniaxiale, drainé des deux côtés. On suppose que l'expulsion du fluide est provoqué par une surpression maximum au centre de l'échantillon, entraînant un gradient hydraulique dans l'échantillon

Notations :

h : hauteur de l'échantillon

S : section de l'échantillon

v_e : vitesse d'expulsion du fluide durant l'essai (déduite du débit)

v : vitesse de Darcy

u : pression interstitielle au milieu de l'échantillon

d : déformation axiale

e : epsilon (en 1 seconde)

n : porosité

V : volume de fluide expulsé hors de l'échantillon (en 1 seconde)

k : coefficient de perméabilité

i : gradient hydraulique

Calcul

Le calcul est fait pour de l'eau. Pour un liquide d'autre viscosité, il faut appliquer une correction.

En 1 s, la déformation axiale d correspond à un volume de fluide expulsé

$$V = d.S.n \quad \text{ou encore} \quad V = e.h.S.n$$

Le débit sortant de l'échantillon est donc $Q = V / 1s$

$$\text{Or, } Q = v_e .S \quad \text{On a donc } v_e = e.h.n$$

D'autre part, la loi de Darcy donne $v = k.i$ avec $i = u / (h/2)$ donc $v = 2.k.u / h$

En égalant les deux vitesses, on a : $e.h.n = 2. k. u / h$ d'où

$$u = (e.h^2.n) / (2.k) \quad \text{attention : } u \text{ est en m d'eau!}$$

Exemple :

une craie, avec $E = 5 \text{ GPa}$, chargée avec une vitesse de 10^{-3} MPa/s , se déforme à $2. 10^{-6} /s$. En supposant une perméabilité de $5. 10^{-9} \text{ m/s}$ (0.5 mD), une hauteur d'échantillon de 0.05 m et une porosité de 0.4,

on a une surpression de 1.25 m d'eau soit **0.0125 MPa**,

ce qui est négligeable et bien inférieur à la limite de résolution des capteurs de pression utilisés (0.1 MPa dans le meilleur des cas).

Annexe 6 - mode opératoire du collage de jauges sur la craie (Djebbi, 1984)

INSTALLATION DES JAUGES.

C'est l'opération la plus délicate car elle conditionne la réussite de l'essai tout entier. Tout échec conduit à une perte énorme en temps et en produits très coûteux. Il est donc indispensable que les étapes qui vont suivre soient réalisées en prenant toutes les précautions possibles.

Etape 1

Afin d'obtenir un collage efficace sur la surface de la roche qui est dans notre cas très poreuse, il est nécessaire de réaliser une couche d'adhérence. Cette sous couche est faite par application sur l'aire de collage (environ le double de la surface de la jauge utilisée) de colle (strain gage cement PC-12 KYOWA). Pour accélérer l'opération de polymérisation, l'éprouvette est étuvée à 80°C pendant 20 minutes environ.

Etape 2

L'enduit a une raideur supérieure à celle de la craie. Aussi pour qu'il ne perturbe pas le champ de déformation (cisaillement provoquant un décollement), et afin que les signaux de jauges indiquent la déformation réelle de l'échantillon, il est nécessaire de réduire l'épaisseur de la sous couche d'adhérence sans toutefois atteindre la structure. Cette opération très délicate est faite manuellement au papier abrasif. Après cela, on trace très légèrement sur la surface de collage deux axes perpendiculaires passant par le point à étudier. L'un de ces axes sera dans la direction de la mesure de déformation.

Etape 3

Après avoir effectué un dépoussiérage des aires de collage, l'on procède au collage des jauges selon la méthode préconisée par VISHAY MICROMESURES 1 Les jauges utilisées (de longueur active égale à 6 millimètres) seront sans pattes de sortie ; les fils de connexion seront soudés directement sur la jauge. La colle utilisée est une colle au métyl-2-cyanoacrylate qui polymérise presque instantanément (VISHAY-MICROMESURES-M 200).

Etape 4

Dans les premiers essais de fluage, nous avons soudé directement aux jauges des câbles de faible résistance (0,38f~/m) afin d'éviter le phénomène de désensibilisation des mesures, et de nous dispenser de corriger les mesures à chaque essai. Cependant, là aussi, nous n'avons pas pu exploiter certaines mesures. En effet, les liaisons directes de ces câbles gainés de gros diamètre (0 0,3mm) constitués de fils torsadés ont provoqué des ruptures au niveau de la soudure. En outre, ces conducteurs qui relient les jauges à l'instrument de mesure traversent la jaquette en silastène laquelle est soumise à une pression d'huile (pression latérale).

Malheureusement, cette huile percole lentement entre la gaine du fil et les brins, et arrive dans l'échantillon à tester ce qui rend inexploitable un essai de fluage long.

Pour éviter ces risques, nous avons choisi un fil émaillé en polyimide et dont le diamètre est plus faible ($0,2/100\text{mm}$) comparé à celui du câble. Ce fil sert d'intermédiaire entre les jauges et l'extérieur de la jaquette où arrivent de nouveau les câbles qu'on avait utilisés auparavant. La résistance de ces fils ($0,9\text{P/m}$) est, par contre, plus importante que celle des câbles. C'est la raison pour laquelle ces fils doivent avoir les longueurs les plus faibles possibles afin de ne pas désensibiliser les mesures.

Etape 5

Au cours des essais de fluage, nous avons été confrontés à d'énormes, problèmes d'isolement dus aux conditions d'environnement très difficiles, notamment lors de l'injection d'eau sous pression dans la structure. Ainsi nous avons été amenés, en fonction des conditions opératoires, à sélectionner les moyens de protection les plus efficaces contre l'humidité.

Dans ce qui suit, nous décrivons les procédés et les produits que nous avons adopté pour l'enrobage.

- une première couche de M coat D (VISRAY MICROMESURES) couvre toute la surface latérale de la structure y compris les jauges. Excellent isolant le M coat D sèche en 30 minutes ; les propriétés définitives s'obtiennent en 24 heures à 20°C .
- une deuxième couche de M coat B (VISHAY MICROMESURES) est appliquée à la première et sur une distance courte (1 centimètre environ) des fils en partant des points de soudure de la jauge. Ce produit sèche en 1 heure à la température ambiante.
- une troisième couche de M coat G (VISHAY MICROMESURES) après une période de 24 heures de polymérisation à la température ambiante ; une dernière protection est assurée par M coat B. Cet enrobage peut surtout résister aux effets de l'eau des huiles.

PASSAGE AU TRAVERS DE LA JAQUETTE

Un bobinage des fils fins autour de l'échantillon avant leur passage travers la jaquette par un trou commun s'est avéré néfaste. En effet, un contact entre les différents fils, au niveau de l'éprouvette et de la jaquette, sous pression forte fait dénuder sinon cisailer les fils par effet de compression.

Pour éliminer ce risque, nous avons percé des passages à travers la jaquette au-dessus des points de soudure de chaque jauge, évitant ainsi un passage commun à tous les fils. L'échantillon est mis en place, on tire les fils au maximum et on vient reboucher les trous par application d'un silicone (GB - VISHAY MICROMESURES). A l'extérieur de la capote, les câbles de mesure viennent se souder aux fils émaillés. Cette soudure est protégée par le silicone précité.

