



HAL
open science

Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques : rôle de la microstructure

Zemenu Geremew Yigzaw

► **To cite this version:**

Zemenu Geremew Yigzaw. Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques : rôle de la microstructure. Planète et Univers [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009. Français. NNT : 2009ENMP1668 . pastel-00005865

HAL Id: pastel-00005865

<https://pastel.hal.science/pastel-00005865>

Submitted on 12 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ED n°398 – Géosciences et Ressources Naturelles, Paris

T H E S E

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS
Spécialité “Géologie de l'Ingénieur”

présentée et soutenue publiquement par
Zemenu Geremew YIGZAW

le 2 décembre 2009

**Analyse des processus de retrait-gonflement des sols argileux en réponse
à des sollicitations hydriques cycliques. Rôle de la microstructure**

Jury

M.	DELAGE	Pierre	Président
Mme	AUDIGUIER	Martine	Examinatrice
M.	COJEAN	Roger	Directeur de thèse
M.	CUI	Yujun	Rapporteur
M.	DEFFONTAINES	Benoît	Examineur
M.	FABRE	Richard	Rapporteur
M.	OLIVIERO	Hubert	Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement l'ensemble des personnes qui ont contribué au travail de thèse présenté dans ce mémoire.

Ma profonde gratitude s'adresse à mon Directeur de thèse, Monsieur Roger COJEAN, Directeur de recherche à Mines ParisTech, qui m'a témoigné son soutien et sa confiance et qui m'a prodigué un enseignement toujours judicieux et rigoureux durant toutes les phases de la thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

J'adresse tout particulièrement mes vifs remerciements à Madame Martine AUDIGUIER, Chargée de recherche à Mines ParisTech, qui a co-encadré mon travail et m'a transmis une partie de ses connaissances dans le domaine de la recherche expérimentale. Sa maîtrise des différentes expérimentations au laboratoire, ses conseils, ses encouragements, et sa disponibilité ont été du plus grand secours tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie Monsieur Pierre DELAGE, Professeur à l'Ecole des Ponts ParisTech et Directeur du CERMES-ENPC, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'accepter de présider le jury.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux rapporteurs, Monsieur Yu-Jun CUI, Professeur à l'Ecole des Ponts ParisTech et Monsieur Richard FABRE, Professeur à l'Université Bordeaux 1, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail et pour leurs critiques constructives. Je remercie également Monsieur Benoît DEFFONTAINES, Professeur à l'Université Paris VI et Monsieur Hubert OLIVIERO, Directeur général de la Fondation MAIF pour leur participation au jury de thèse en tant qu'examineurs.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Michel DEVEUGHELE ancien directeur du CGI (Centre de Géologie de l'Ingénieur) où j'ai commencé ma recherche, ainsi qu'à l'ensemble du personnel qui m'a cordialement accueilli (le CGI a par la suite intégré une structure plus large : le Centre de Géosciences de Mines ParisTech) et plus particulièrement, à Monsieur Jean-Michel LE CLEAC'H, Chargé de recherche à Mines ParisTech qui m'a assisté dans la partie concernant l'analyse d'images des essais de fissuration, à Monsieur José ROSELLY-BENOIT, Monsieur Jean SOUVIROU et Madame Yasmina HABAOUÏ pour leur aide lors de la réalisation des essais, pour leur soutien moral et pour leur bonne humeur.

J'adresse enfin mes remerciements au gouvernement français, qui m'a permis de réaliser ce travail grâce à une bourse accordée par le Ministère des Affaires Etrangères. Un remerciement tout particulier est adressé à Monsieur Jean-Michel NAMUR, chargé des relations internationales au CROUS de Créteil, qui m'a aidé lors de toutes les démarches administratives.

Ce travail de recherche s'est déroulé principalement dans le cadre du projet « Aléa et risque sécheresse » soutenu par la Fondation MAIF. Les discussions lors des réunions du projet ont constitué des éléments importants pour l'aboutissement de ce travail. Je remercie toutes les personnes impliquées dans ce projet. Le travail de recherche a aussi contribué au projet ANR-RGCU ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) et

au projet « Sécheresse géotechnique et bâti » du R2DS (Réseau de Recherche sur le Développement Soutenable), soutenu par la région Ile-de-France.

Merci enfin à tous mes amis et à toute ma famille pour leurs encouragements et leur soutien permanent.

RESUME

En France métropolitaine, les périodes récentes de déficit hydrique ont mis en évidence la vulnérabilité des constructions fondées sur certains sols argileux présentant une sensibilité particulière au phénomène de retrait-gonflement. La présence de plusieurs formations argileuses affleurantes ou sub-affleurantes dans le bassin de Paris fait de l'Île-de-France l'une des régions les plus vulnérables aux périodes de sécheresse. Deux formations sont plus particulièrement concernées : les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil. Dans ce travail de thèse, ces deux formations géologiques ont été analysées. Cette analyse comporte d'une part, une caractérisation minéralogique, géotechnique, hydrique et microstructurale des deux formations ; d'autre part, des essais hydromécaniques cycliques couplés à l'analyse microstructurale afin d'étudier le comportement et l'évolution des matériaux au cours de sollicitations cycliques. L'ensemble des essais a été réalisé sur des échantillons des deux formations prélevés en carrière sur deux sites différents : la carrière de Cormeilles-en-Parisis (95) à l'Ouest de Paris et la carrière de Villeparisis-Le Pin (77) à l'Est de Paris.

Les résultats des analyses minéralogiques des échantillons des deux formations prélevés dans les deux carrières, mettent en évidence une composition minéralogique voisine et ainsi une continuité de faciès. Les Argiles vertes de Romainville sont généralement composées de minéraux argileux (de l'illite principalement, des smectites et de la kaolinite), de quartz, de carbonates (calcite et/ou dolomite), de traces de feldspaths et de micas. Les Marnes bleues d'Argenteuil contiennent des carbonates (calcite) majoritairement, du quartz, des traces de pyrite et des minéraux argileux (de l'illite en majorité, des smectites et en plus faible proportion de la kaolinite). Les Marnes bleues inférieures, par contre, contiennent essentiellement des argiles fibreuses (attapulgite principalement). Les deux formations ont une granulométrie fine (plus de 78 % inférieurs à 2 μm). Les sols correspondants sont plastiques, voire très plastiques, peu denses avec une porosité élevée comprise entre 39 et 50 %. Les observations au MEB (microscope électronique à balayage) ont montré que les Argiles vertes présentent, à l'état naturel, une microstructure laminaire-turbulente ou matricielle alors que les Marnes bleues présentent une microstructure « en squelette », avec un aspect compact et hétérogène où les minéraux argileux se présentent, soit disséminés dans le matériau et pincés entre les grains de calcite, soit libres. L'abondance des carbonates rend le matériau intact « semi-rigide ».

L'analyse des transferts hydriques menée conjointement avec la mesure du volume des échantillons a montré que l'essentiel des transferts hydriques a lieu pour des succions imposées comprises entre 1 et 305 MPa et que les déformations volumiques importantes se réalisent pour des succions inférieures à 15 MPa dans le cas des Argiles vertes de Romainville et 30 MPa dans le cas des Marnes bleues d'Argenteuil, pour lesquelles il existe une continuité du film d'eau entre les particules ou amas argileux.

La limite de retrait et le point d'entrée d'air sont proches dans le cas des Argiles vertes de Romainville. Par contre, ils sont éloignés l'un de l'autre pour la Marne bleue d'Argenteuil. Ceci est expliqué par leur microstructure à l'origine d'un squelette semi-rigide s'opposant en partie au retrait, ce qui confère à ces marnes un comportement de sol très raide.

Les résultats expérimentaux, des mesures directes de paramètres mécaniques (pression et taux de gonflement) de sols intact et remanié, montrent une différence importante de comportement entre les deux sols qui est largement expliquée par les microstructures différentes. Ils mettent

en évidence aussi le rôle que peuvent jouer d'autres minéraux présents dans le sol (plus particulièrement des carbonates), l'état de remaniement du sol et les conditions initiales (densité sèche, teneur en eau) sur la sensibilité au retrait-gonflement et sur l'évolution microstructurale du matériau naturel ou remanié, lors de cycles « hydratation-séchage ».

Enfin, les résultats d'essais cycliques et l'étude microstructurale par l'observation au MEB et par la porosimétrie au mercure montrent l'irréversibilité partielle de la déformation due au retrait-gonflement et l'importance de la microstructure du sol dans la réponse des matériaux aux sollicitations hydriques cycliques.

Mots clés : Sols argileux, sols marneux, retrait-gonflement, microstructure, MEB, Porosimétrie

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 ANALYSE DES MATERIAUX ETUDIES	5
1.1 INTRODUCTION	5
1.2 LOCALISATIONS GEOGRAPHIQUES ET STRATIGRAPHIQUES DES ECHANTILLONS PRELEVES ET ETUDIES	5
1.2.1 <i>Localisations géographiques des sites de prélèvement</i>	5
1.2.2 <i>Géologie et Stratigraphie des sites de prélèvement</i>	7
1.3 PRESENTATION DES ECHANTILLONS ETUDIES	11
1.4 CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOTECHNIQUE ET MECANIQUE DES SOLS ETUDIES	13
1.4.1 <i>Caractérisation minéralogique</i>	13
1.4.1.1 Echantillons de l'Est de Paris	14
1.4.1.2 Echantillons de l'Ouest de Paris (Cormeilles-en-Parisis)	22
1.4.1.3 Caractérisation minéralogique des profils des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'Est (Villeparisis-le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) de Paris	26
1.4.2 <i>Caractérisation géotechnique</i>	29
1.4.2.1 Essais d'identification	29
1.4.2.2 Limites de retrait	35
1.4.3 <i>Caractérisation du potentiel de gonflement et de retrait par des méthodes indirectes</i>	37
1.4.4 <i>Caractérisation géotechnique et étude statistique des profils des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) de Paris</i>	39
1.4.4.1 Caractérisation géotechnique	39
1.4.4.2 Etude Statistique	41
1.4.5 <i>Corrélations entre différents paramètres géotechniques</i>	43
1.4.6 <i>Corrélations pour l'ensemble des paramètres géotechniques des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Est et de l'Ouest</i>	45
1.5 CONCLUSION	46
CHAPITRE 2 COURBES DE DRAINAGE ET D'HUMIDIFICATION DES MATERIAUX ETUDIES	47
2.1 INTRODUCTION	47
2.2 PROTOCOLES EXPERIMENTAUX	47
2.2.1 <i>Mesure de la succion naturelle</i>	48
2.2.2 <i>Méthode Osmotique</i>	49
2.2.3 <i>Méthode de la pression de vapeur imposée par des solutions salines saturées</i>	49
2.2.4 <i>Mesure des variations de volume</i>	50
2.3 COURBE DE RETENTION DE L' ARGILE VERTE	50
2.3.1 <i>Méthode osmotique</i>	50
2.3.2 <i>Courbes obtenues par la méthode en phase vapeur</i>	51
2.3.3 <i>Variation de l'indice des vides et du degré de saturation</i>	55
2.3.4 <i>Le rôle de la succion sur le squelette solide et sur la phase eau</i>	59
2.4 COURBE DE RETENTION DES MARNES BLEUES D' ARGENTEUIL DE LA CARRIERE VILLEPARISIS-LE PIN	60
2.5 COURBE DE RETENTION DES ARGILES VERTES REMANIEES	62
2.6 PARAMETRES DE VAN GENUCHTEN	66
2.7 CONCLUSION	67
CHAPITRE 3 ANALYSE DE GONFLEMENT DES MATERIAUX ETUDIES	69
3.1 INTRODUCTION	69
3.2 PROTOCOLES D'ESSAI	69
3.3 RESULTATS	71
3.3.1 <i>Gonflement libre</i>	71

3.3.2	<i>Modélisation du gonflement par une loi hyperbolique</i>	83
3.3.3	<i>Pression de gonflement</i>	89
3.4	METHODES INDIRECTES	95
3.5	CONCLUSION	100
CHAPITRE 4 COMPORTEMENT DES SOLS ETUDIES SOUS SOLlicitATIONS HYDRIQUES CYCLIQUES		101
4.1	INTRODUCTION	101
4.2	PROCEDURE EXPERIMENTALE	101
4.3	SOLS ETUDIES ET RESULTATS	102
4.3.1	<i>Les Argiles vertes de Romainville de l'Est inférieures (EAVR-0)</i>	102
4.4	LES MARNES BLEUES D'ARGENTEUIL (EMBA-1 ET EMBA-01)	105
4.4.1	<i>Les Marnes bleues d'Argenteuil EMBA-1</i>	105
4.4.1.1	Les Marnes bleues d'Argenteuil EMBA-01	108
4.4.1.2	Les Argiles vertes de Romainville remaniées/colluvions (EAVR-C)	110
4.5	CONCLUSION	112
CHAPITRE 5 ASPECTS STRUCTURAUX ET MICROSTRUCTURAUX DU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX		113
5.1	FISSURATION DU SOL DUE A LA DESSICCATION	113
5.1.1	<i>Retrait et fissuration d'échantillons intacts</i>	113
5.1.1.1	Matériaux et méthodes	113
5.1.1.2	Résultats	114
5.1.2	<i>Retrait et fissuration d'échantillons remaniés</i>	117
5.1.2.1	Préparation d'échantillon et conditions de séchage	117
5.1.2.2	Résultats	118
5.1.2.3	Caractéristiques des réseaux de fissures de l'échantillon EMBA-1 et dynamique d'évolution	123
5.1.3	<i>Evolution de la teneur en eau et de la succion à la fissuration</i>	125
5.1.4	<i>Conclusion</i>	126
5.2	ASPECTS MICROSTRUCTURAUX DU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX	127
5.2.1	<i>Introduction</i>	127
5.2.2	<i>Préparation des échantillons</i>	127
5.2.3	<i>Description sommaire des techniques opératoires</i>	128
5.2.3.1	Microscopie électronique à balayage	128
5.2.3.2	Porosimétrie au mercure	128
5.2.4	<i>Caractéristiques microstructurales</i>	131
5.2.4.1	Observation au MEB	132
5.2.4.2	Etude porosimétrique	164
5.2.5	<i>Conclusion générale concernant l'étude de la microstructure</i>	187
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES		189
6.1	CARACTERISATIONS MINERALOGIQUES ET GEOTECHNIQUES	189
6.2	CARACTERISTIQUES HYDRIQUES	190
6.3	ESSAIS DE GONFLEMENT	191
6.4	SOLlicitATION HYDRIQUES CYCLIQUES	192
6.5	ETUDE DE FISSURATION	193
6.6	ETUDE MICROSTRUCTURALE	193
6.7	PERSPECTIVES	194
BIBLIOGRAPHIE.....		195
ANNEXE		

LISTES DES FIGURES

Figure 1.2.1 : Localisation des sites des 2 carrières par images satellite (d'après Google imagerie 2009).....	6
Figure 1.2.2 : Carte géologique du bassin de Paris, d'après la Carte géologique de la France au 1/1.000.000 (Chantraine et al., 1996) ; 1) Quaternaire et alluvions récentes, 2) Tertiaire, 3) Crétacé supérieur, 4) Crétacé inférieur, 5) Jurassique supérieur, 6) Jurassique moyen, 7) Jurassique inférieur, 8) Trias, 9) Paléozoïque et socle. Le cadre rouge représente la zone d'étude.	7
Figure 1.2.3 : Coupe géologique du bassin de Paris (modifié d'après Pomerol et Feugueur 1986).....	8
Figure 1.2.4 : a) Front de taille de l'Argile verte de Romainville dans la carrière de Cormeilles-en-Parisis (avril 2008) ; (b) Partie inférieure du banc d'Argile verte de Romainville ; (c) partie supérieure du banc d'Argile verte de Romainville, avec à la base présence d'un banc calcaire décimétrique (partie blanche) et au sommet le contact avec le banc des caillasses d'Orgemont.....	10
Figure 1.4.1: Diffractogrammes RX des lames de poudres des échantillons de l'est de Paris : a) Argiles vertes de Romainville inférieures, supérieures, et remaniées (Colluvions) ; b) Marnes bleues d'Argenteuil inférieures et supérieures	15
Figure 1.4.2 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons d'Argiles vertes de Romainville de l'est de Paris ; a) E-AVR-0, b) E-AVR-1	16
Figure 1.4.3 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil de l'est de Paris ; a) E-MBA-1, b) E-MBA-0.....	17
Figure 1.4.4 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil : E-MBA-01 (a) et des Argiles vertes de Romainville (colluvions) : E-AVR-C (b).....	18
Figure 1.4.5 : Spectres infra-rouge (IR) des argiles AVR et de MBA	20
Figure 1.4.6 : Thermogrammes des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil : a) AVR ; b) MBA.....	21
Figure 1.4.7 : Diffractogrammes RX des lames de poudres des échantillons de l'ouest de Paris : a) Argiles vertes de Romainville inférieures et supérieures ; b) Marnes bleues d'Argenteuil inférieures et supérieures.....	23
Figure 1.4.8 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons d'Argiles vertes de Romainville de l'ouest de Paris ; a) W-AVR-1, b) W-AVR-0.....	24
Figure 1.4.9 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil ; a) W-MBA-1, b) W-MBA-0.....	25
Figure 1.4.10 : Distribution du quartz (a) des carbonates dosés par calcimétrie (b) et des feldspaths (c) le long des profils de l'Argile verte de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis).....	27
Figure 1.4.11 : Distribution des minéraux argileux le long des profils de l'Argile verte de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis), kaolinite (a), illite (b), smectites et interstratifiés (c).....	28
Figure 1.4.12 : Limite de liquidité et indice de plasticité des sols étudiés reportés sur le diagramme de plasticité de Casagrande (a) pour l'Est et (b) pour l'Ouest	32
Figure 1.4.13 : Courbes granulométriques des échantillons étudiés a) Villeparisis-Le Pin, b) Cormeilles-en-Parisis	33
Figure 1.4.14 : Déformation latérale en fonction de la teneur en eau déterminée à partir du traitement d'images d'échantillons E-AVR-0 observés perpendiculairement et parallèlement au litage.....	35
Figure 1.4.15 : Déformations verticales, en fonction de la teneur en eau, mesurées en différents points, pour des échantillons de E-AVR-0 ; (a) échantillon taillé perpendiculairement au litage, (b) parallèlement au litage	36

Figure 1.4.16 : Classification du potentiel de retrait-gonflement des sols étudiés : classification de Dakshanamurphy et Raman (1973) a) sols de l'Est, b) sols de l'Ouest ; classification de Williams et Donaldson (1980) c) sols de l'Est, d) sols de l'Ouest	38
Figure 1.4.17 : Caractérisation géotechnique des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Est (Villeparisis-Le Pin) et de l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) ; (a) % < 2 μ m, (b) limites d'Atterberg (w_L , w_p , I_p), (c) limites de retrait (w_R , I_R , dV/V), (d) valeur de bleu	39
Figure 1.4.18 : Position des échantillons correspondant aux profils des 2 sites : a) charte du potentiel de gonflement des sols établie par Daksanamurthy et Raman (1973), (b) classification de Williams et Donaldson (1980)	40
Figure 2.2.1 : Courbe d'étalonnage du papier filtre Whatman n° 42 (Parcevaux 1980)	48
Figure 2.2.2 : Dispositif d'imposition de la succion par phase vapeur	49
Figure 2.3.1 : Drainage (a) et humidification (b) par phase vapeur des échantillons d'Argile verte de l'Ouest ...	52
Figure 2.3.2 : Courbes de rétention de l'Argile verte de Romainville par la méthode en phase vapeur : (a) Argiles vertes de l'Est, carrière de Villeparisis-Le Pin ; (b) Argiles vertes de l'Ouest, carrière de Cormeilles-en-Parisis.....	53
Figure 2.3.3 : Courbes de rétention de l'Argile verte de Romainville prélevée à l'Est de Paris	54
Figure 2.3.4 : Courbes de rétention des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'est et à l'ouest de Paris.....	55
Figure 2.3.5 : Comportement global des Argiles vertes de Romainville de l'Est au cours d'un cycle de drainage-humidification, (w_{Re} = limite de retrait effective, Sw_{Re} = succion à la limite de retrait effective) 57	
Figure 2.3.6 : Comportement global des Argiles vertes de Romainville de l'Ouest au cours d'un cycle de drainage-humidification, (w_{Re} = limite de retrait effective, Sw_{Re} = succion à la limite de retrait effective).....	58
Figure 2.3.7 : Comparaison entre la limite de retrait déterminée par mesure de volume lors du séchage à l'air libre et par imposition des paliers de succion (a) pour des Argiles vertes de l'Est et b) pour les Argiles vertes de l'Ouest	59
Figure 2.3.8 : Comparaison entre l'effet de variation de la succion sur le squelette du sol et sur la phase d'eau (a) pour des Argiles vertes de l'Est et b) pour les Argiles vertes de l'Ouest.....	59
Figure 2.4.1 : Courbe de rétention des Marnes bleues d'Argenteuil prélevées à l'est de Paris.....	60
Figure 2.4.2 : Comportement global des Marnes bleues d'Argenteuil de l'est au cours d'un cycle séchage – humidification, (w_{Re} = limite de retrait effective, Sw_{Re} = succion à la limite de retrait effective) 61	
Figure 2.4.3 : Comparaison entre l'effet de variation de la succion sur le squelette solide et sur la phase eau pour des Marnes bleues de l'Est, carrière Villeparisis-Le Pin	62
Figure 2.5.1 : Courbes de rétentions pour E-AVR-C et E-AVR-0 reconstitué	63
Figure 2.5.2 : Comportement global des Argiles vertes remaniées (colluvions et sol reconstitué) de l'Est au cours d'un cycle de séchage ; w_{Re} : limite de retrait effective, Sw_{Re} : succion à la limite de retrait effective).....	64
Figure 2.5.3 : Comparaison des courbes de rétentions d'échantillons d'Argiles vertes de Romainville présentant des conditions initiales différentes.....	65
Figure 2.6.1 : Courbes de rétention de sols étudiés : (a) E-AVR-0 ; (b) W-AVR-0 ; (c) E-MBA-1 ; (d) E-AVR-C	66
Figure 3.2.1 : (a) Essais oedométriques avec moules oedométriques conventionnels, (b) Moule de type oedométrique en plexiglas (Parcevaux, 1980).....	70
Figure 3.3.1: Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EAVR-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales.....	75
Figure 3.3.2 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EAVR-1 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales.....	76

Figure 3.3.3 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EAVR-C testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales	76
Figure 3.3.4 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EMBA-01 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales	77
Figure 3.3.5 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EMBA-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales	77
Figure 3.3.6 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons WAVR-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales	78
Figure 3.3.7 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons WAVR-1 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales	78
Figure 3.3.8 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons WMBA-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales	79
Figure 3.3.9 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) pour les Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil remaniées, étudiées : carrière de Villeparisis-Le Pin	80
Figure 3.3.10 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) pour les Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil remaniées, étudiées : carrière de Corneilles-en-Parisis	81
Figure 3.3.11 : Relation entre le gonflement maximal et la teneur en eau initiale (à gauche) et la densité sèche initiale (à droite) pour les différents échantillons testés sous une charge verticale $\sigma_v = 2$ kPa	82
Figure 3.3.12 : Cinétique du gonflement $\Delta H/H_0$ en fonction du temps	83
Figure 3.3.13 : Cinétique du gonflement : Relation $t/(\Delta H/H_0)$ en fonction de t (mn)	85
Figure 3.3.14 : Relation entre les taux de gonflement mesurés et calculés (à gauche), et relation entre les temps de demi-gonflement mesurés et calculés (à droite) pour les Argiles vertes de Romainville de l'Est testées dans leur état naturel	86
Figure 3.3.15 : Relation entre les taux de gonflement mesurés et calculés (à gauche), et relation entre les temps de demi-gonflement mesurés et calculés (à droite) pour les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est testées dans leur état naturel	87
Figure 3.3.16 : Relation entre les taux de gonflement mesurés et calculés (à gauche), et relation entre les temps de demi-gonflement mesurés et calculés (à droite) pour les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest testées dans leur état naturel	88
Figure 3.3.17 : Méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation. La pression de gonflement correspond à la pression pour laquelle l'échantillon repasse par la valeur de l'indice des vides initial. Exemple de EAVR pour 3 indices des vides initiaux différents	89
Figure 3.3.18 : Détermination de la pression de gonflement par la méthode du volume constant pour les Argiles vertes de Romainville de l'Est testées dans leur état naturel	92
Figure 3.3.19 : Détermination de la pression de gonflement par la méthode du volume constant pour les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est testées dans leur état naturel	93
Figure 3.3.20 : Détermination de la pression de gonflement par la méthode du volume constant pour les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest testées dans leur état naturel	94
Figure 4.2.1 : Appareillage a) moules cylindriques en plexiglas b) étuve de séchage	102
Figure 4.3.1 : Cinétique de gonflement de l'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) Ech-I, b) Ech-II, c) Ech-III, d) Ech-IV	103
Figure 4.3.2 : Eprouvette d'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet : a) échantillon après la première phase de gonflement, b) après la première phase de séchage, apparition de fissuration, c) échantillon après la septième phase de séchage	104

Figure 4.3.3 : Taux de gonflement et retrait de l'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) taux de gonflement et de retrait b) épaisseur des échantillons.....	104
Figure 4.3.4 : Taux de gonflement et retrait de l'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet : a) Taux de gonflement cumulé et pour chaque cycle et b) taux de retrait pour chaque cycle	105
Figure 4.4.1 : Courbes de gonflement libre de la Marne bleue d'Argenteuil (EMBA-1) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet a) échantillon Ech-II et b) échantillon Ech-III.....	106
Figure 4.4.2 : Eprouvettes de Marnes bleues d'Argenteuil soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) échantillon après la première phase de séchage b) après la quatrième phase de séchage, apparition de fissures, c) échantillon après la septième phase de séchage	106
Figure 4.4.3 : Taux de gonflement et retrait des Marnes bleues d'Argenteuil soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) Taux de gonflement cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-II et Ech-III ; b) Taux de retrait cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-II et Ech-III ; c) taux de gonflement et de retrait pour chaque cycle ; d) épaisseur des échantillons.....	107
Figure 4.4.4 : Eprouvettes de Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-01) après une première phase d'imbibition totale et de séchage complet : a) Ech-I, b) Ech-II, c) éch-III. Les cercles montrent les lits de matériau plus argileux	108
Figure 4.4.5 : Courbes de gonflement libre de la Marne bleue d'Argenteuil (EMBA-01) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet a) Ech-II, b) Ech-III.....	109
Figure 4.4.6 : Taux de gonflement et retrait de Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-01) soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet : a) taux de gonflement cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-I, Ech-II et Ech-III ; b) taux de retrait des échantillons pour chaque cycle ; c) taux de gonflement et de retrait ; d) épaisseur des échantillons.....	110
Figure 4.4.7 : Courbes de gonflement libre des Argiles vertes de Romainville remaniées/colluvions (EAVR-C) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet a) Ech-I b) Ech-II.....	111
Figure 4.4.8 : Taux de gonflement et retrait de l'Argile verte de Romainville remaniée/colluvions (EAVR-C) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet : a) taux de gonflement cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-I et Ech-III; b) taux de retrait des échantillons pour chaque cycle c) taux de gonflement et de retrait d) épaisseur des échantillons.....	111
Figure 5.1.1 : a) Evolution du retrait surfacique en fonction de la teneur en eau pour les échantillons d'EAVR-0 perpendiculaire et parallèle au plan du litage, b) Comparaison entre le retrait surfacique et le retrait vertical.....	114
Figure 5.1.2 : Evolution du réseau de fissures à la surface d'un échantillon d'Argiles vertes de Romainville au cours de la dessiccation-humidification : a) état naturel, b) traces des fissures de a), c) traces après séchage jusqu'à $w = 17\%$ d) traces après le 1er séchage complet, e) traces après la 1ère humidification, f) traces après le 2ème séchage, g) après la 2ème humidification, h) après 3 cycles séchage-humidification, i) ouvertures des fissures au cours de l'imbibition ($w > w_R$).....	115
Figure 5.1.3 : Evolution du retrait surfacique total (a) et du réseau de fissures (b) à la surface du sol en fonction de la teneur en eau pondérale d'un échantillon d'Argile verte de Romainville au cours de la dessiccation – humidification	116
Figure 5.1.4 : Echantillon intact de Marne bleue d'Argenteuil : a) après séchage, b) après imbibition ($w > w_R$).....	116
Figure 5.1.5 : Support rugueux en plexiglas	117
Figure 5.1.6 : Essais de dessiccation	118
Figure 5.1.7 : Variation de teneur en eau en fonction du temps : des Argiles vertes de Romainville, (a) échantillons cylindriques ($D=10$ mm, $e=10$ mm), (b) échantillons rectangulaires ; des Marnes	

bleues d'Argenteuil, (c) échantillons cylindriques ($w = 192 \pm 1$ %), (d) échantillons rectangulaires	119
Figure 5.1.8 : Séchage EAVR-0 remanié $D = 185$ mm, $e = 20$ mm.....	120
Figure 5.1.9 : Evolution du réseau de fissures sur la surface des échantillons de Marne bleues d'Argenteuil remaniée	121
Figure 5.1.10 : EAVR-0 remanié, a) $w_0 = 112$ %, b) après séchage, c) imbibition $w > w_R$	122
Figure 5.1.11 : EMBA-1 remanié, a) $w_0 = 134$ %, b) après séchage, c) imbibition $w > w_R$	122
Figure 5.1.12 : Evolution du réseau de fissures à la surface d'un échantillon de Marne bleues d'Argenteuil remaniée : a) rapport surface de fissure / surface du sol, b) longueur et largeur moyenne des fissures c) paramètres identiques en n° de pixels (surface de l'échantillon d'origine 1050 x 1050 pixels)	124
Figure 5.1.13 : Processus de fissuration des Marnes bleues d'Argenteuil remaniée : a) initiation des fissures, b) initiation de fissures s'interceptant à 90° , c) les nouvelles fissures rejoignent à angle droit les anciennes, sans les perturber, d) géométrie finale de la fissuration avec fissures s'interceptant à 120° (encerclé).....	125
Figure 5.1.14 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps	126
Figure 5.2.1 : Pore en encrier. (1) Première injection; (2) deuxième injection; (3) porosité piégée : soustraction (1) - (2), (d'après Delage Pellerin, 1984).....	129
Figure 5.2.2 : Comparaison des courbes de porosimétrie au mercure cumulées et dérivées obtenues sur des échantillons naturels d'Argiles vertes de Romainville: a) volumes cumulés, b) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec similaire ; c) volumes cumulés, d) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec différents	130
Figure 5.2.3 : Comparaison des courbes de porosimétrie au mercure cumulées et dérivées obtenues sur des échantillons naturels de Marnes bleues d'Argenteuil : a) volumes cumulés, b) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec similaire ; c) volumes cumulés, d) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec différents	131
Figure 5.2.4 : Texture d'EAVR-0 naturel ($w = 24,9$ %) : dans le plan de litage (a et b), perpendiculaire au plan du litage (c et d), et e) cartographie EDS, présence de nombreux grains de carbonate et de quartz..	135
Figure 5.2.5 : Texture d'EAVR-1 naturel ($w = 25,3$ %) dans le plan du litage : (a) vue globale (b) présence de quartz (c) détail des contacts entre des grains non-argileux et les argiles et (d) détail de contacts entre les amas argileux et présence de microfissure	136
Figure 5.2.6 : Texture d'EAVR-C naturel ($w = 24,9$ %) dans le plan du litage : (a) vue globale, (b) texture à dominante argileuse, (c) présence des grains de dolomite, (d) présence de smectites et de grains de quartz	137
Figure 5.2.7 : Texture de WAVR-0 naturel ($w = 29,8$ %) : dans le plan du litage (a et b) et perpendiculaire au plan du litage (c et d).....	138
Figure 5.2.8 : Texture d'un échantillon d'EAVR-0 remanié dans le plan du dépôt (a, b et c), (d) cartographie EDS, présence de carbonate (calcite, C) et de quartz (Q) ; (e et f) : texture d'un échantillon de WAVR-0 remanié perpendiculaire au plan du dépôt.....	139
Figure 5.2.9 : Texture d'un Echantillon d'EAVR-0 après un cycle de gonflement libre ($w = 39,3$ %) dans le plan du litage (a et b), et perpendiculaire au plan du litage (c et d).....	140
Figure 5.2.10 : Texture d'un Echantillon d'EAVR-1 après un cycle de gonflement libre : a) et b) dans le plan du litage ; c) d) et e) perpendiculaire au plan du litage.....	143
Figure 5.2.11 : Texture d'un Echantillon d'EAVR-C dans le plan du litage, après un cycle de gonflement libre ($w = 41,4$ %).....	144
Figure 5.2.12 : Texture d'un Echantillon de WAVR-0 perpendiculaire au plan du litage, après un cycle de gonflement libre.....	144

Figure 5.2.13 : Texture d'un échantillon d'EAVR-0 remanié, après un cycle de gonflement libre : dans le plan du dépôt (a, b), perpendiculaire au plan du dépôt (c, d) ; texture d'un échantillon de WAVR-0 remanié après gonflement, perpendiculaire au plan du dépôt.....	145
Figure 5.2.14 : Texture d'un échantillon EAVR-0 après 3 cycles de gonflement : a, b, plan du litage ; c, d, perpendiculaire au plan du litage.....	147
Figure 5.2.15 : Texture d'un échantillon EAVR-0 : a, b après 5 cycles de gonflement ; c, d après 9 cycles de gonflement ; e, f après 11 cycles de gonflement.....	148
Figure 5.2.16 : Images au MEB des Argiles vertes de Romainville : a) succion 3,1 MPa, b) succion 29,5 MPa, et c) succion 305,5 MPa	149
Figure 5.2.17 : Texture d'un échantillon EMBA-1 dans le plan du litage a) vue globale, b) associations calcite-argiles, d) grains de calcite micritique, d) pyrite framboïdale	151
Figure 5.2.18 : Texture d'un échantillon d'EMBA-01 dans le plan du litage (a, b, e, f) et perpendiculaire au plan du litage (c, d) : a) vue globale dans le plan du litage, b) grains de calcite individualisés c) vue globale perpendiculaire à la stratification d) zone dominée par le quartz, e) pyrite framboïdale, f) fragments de test d'organismes	152
Figure 5.2.19 : Texture d'un échantillon d'EMBA-0 dans le plan du litage (a, b) et perpendiculaire au plan du litage (c à f) : a) vue globale dans le plan du litage, b) argiles fibreuses, c) vue globale perpendiculaire à la stratification, d) détail de l'image c, e) amas, de grains de calcite cimentés, f) détail de l'image e.....	153
Figure 5.2.20 : Texture d'un échantillon d'EMBA-1 remanié avant essai de gonflement: a) vue globale dans le plan du dépôt, b) vue globale perpendiculaire au plan du dépôt c) agrégation de grains de calcite d) pyrite en forme de sphérules.....	154
Figure 5.2.21 : Texture d'un échantillon d'EMBA-01 remanié avant essai de gonflement: a) vue globale dans le plan du dépôt, b) vue globale perpendiculaire au plan du dépôt c) amas d'argile d) fragments de tests d'animaux	155
Figure 5.2.22 : Texture d'un échantillon d'EMBA-0 remanié avant essais de gonflement : a) vue globale perpendiculaire au plan du dépôt, b) détail de l'image a, c) présence de calcite emballée dans des argiles fibreuses, d) amas de grains de calcite	156
Figure 5.2.23 : Texture d'un échantillon d'EMBA-1 naturel après un cycle de gonflement: a) vue globale parallèle au plan du litage, b) vue globale perpendiculaire au plan du litage c) détail de microfissure observée sur l'image b, d) présence de pyrite framboïdale non altérée	157
Figure 5.2.24 : Texture d'un échantillon d'EMBA-01 naturel après un cycle de gonflement: a) vue globale parallèle au plan du litage, b et c) vue globale perpendiculaire au plan du litage c) zone plus compacte perpendiculaire au plan du litage, d) ouverture de la porosité grain-argiles	158
Figure 5.2.25 : Texture de l'échantillon d'EMBA-01 naturel après un cycle de gonflement: a) présence de bioclaste, b) présence de pyrite framboïdale associée à des fragments d'organisme c) présence de pyrite associée au gypse d) spectre du gypse.....	159
Figure 5.2.26 : Texture d'un échantillon d'EMBA-0 naturel après un cycle de gonflement: a) vue globale parallèle au plan du litage, b) détail d'une microfissure de l'image a, c) vue globale perpendiculaire au plan du litage, d) détail de la zone de microfissure de l'image c.....	160
Figure 5.2.27 : Texture d'échantillons remaniés perpendiculaire au plan du dépôt après un cycle de gonflement: EMBA-1 remanié (a, b), EMBA-01 remanié (c, d), et EMBA-0 remanié (e, f)	161
Figure 5.2.28 : Echantillons de EMBA-1 : après 4 cycles de gonflement libre, a) vue globale et la microfissuration perpendiculaire au plan du litage, b) détail de la microstructure ; après 6 cycles de gonflement libre c) vue globale de la microfissuration perpendiculaire au plan du litage, d) détail de la microstructure	163
Figure 5.2.29 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-0) à l'état naturel, remanié, séché et après gonflement libre.....	167

Figure 5.2.30 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-1 et EAVR-C) à l'état naturel, séché et après gonflement libre.....	170
Figure 5.2.31 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (WAVR-0) à l'état naturel, séché et après gonflement libre	174
Figure 5.2.32 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (WAVR-1) à l'état naturel, séché et après gonflement libre	174
Figure 5.2.33 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores des Marnes bleues d'Argenteuil lyophilisées (EMBA-1, EMBA-01, EMBA-0 et WMBA-0) à l'état naturel, remanié, séché et après gonflement libre.....	178
Figure 5.2.34 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons d'accès de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-0) pour les cycles 1, 3, 5, 9 et 11. Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des rayons d'accès de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-C) pour les cycles 1, 3, 5	181
Figure 5.2.35 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons d'accès de pores des Marne bleues d'Argenteuil (EMBA-1) pour les cycles 1, 4, 6, 9 et 11. Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des rayons d'accès de pores de EMBA-01 pour les cycles 1, 3, 5	182
Figure 5.2.36 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des accès de pores de EAVR-0 au cours du drainage à différentes succions ; Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des accès de pores de EAVR-0 au cours de la réhumidification	184
Figure 5.2.37 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des accès de pores de EMBA-1 au cours du drainage à différentes succions ; Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des pores de EMBA-1 au cours de la réhumidification à différentes succions	185

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.3.1 : Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est de Paris (carrière de Villeparisis-Le Pin, 77).....	11
Tableau 1.3.2 : Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest de Paris (carrière de Cormeilles-en-Parisis, 95)	11
Tableau 1.3.3 : Log de la formation des Argiles vertes de Romainville de Villeparisis-Le Pin : descriptif de chaque prélèvement	12
Tableau 1.3.4 : Log de la formation des Argiles vertes de Romainville de Cormeilles-en-Parisis : descriptif de chaque prélèvement	13
Tableau 1.4.1 : Analyse minéralogique des sols de l'est de Paris (Villeparisis-Le Pin)	14
Tableau 1.4.2 : Teneur en carbonates des sols étudiés, déterminée par la méthode Dietrich – Frühling	18
Tableau 1.4.3 : Analyse minéralogique des sols étudiés (Cormeilles-en-Parisis)	22
Tableau 1.4.4 : Teneur en carbonates des sols étudiés, déterminée par la méthode Dietrich – Frühling	22
Tableau 1.4.5 : Essais de caractérisation géotechnique réalisés sur les échantillons étudiés	29
Tableau 1.4.6 : Caractéristiques géotechniques des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est (Villeparisis-Le Pin).....	30
Tableau 1.4.7 : Caractéristiques géotechniques des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil et de l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis)	31
Tableau 1.4.8 : Comparaison des potentiels de gonflement et de retrait obtenus par des méthodes indirectes.....	37
Tableau 1.4.9 : Caractéristiques géotechniques des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Est.....	41
Tableau 1.4.10 : Caractéristiques géotechniques des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Ouest.....	42
Tableau 1.4.11 : Résultats de l'analyse statistique effectuée sur les paramètres géotechniques de l'Argile verte de Romainville de l'Est	43
Tableau 1.4.12 : Résultats de l'analyse statistique effectuée sur les paramètres géotechniques de l'Argile verte de Romainville de l'Ouest	43
Tableau 1.4.13 : Corrélations entre valeur de bleu et paramètres géotechniques.....	43
Tableau 1.4.14 : Corrélations entre teneur en carbonates et paramètres géotechniques.....	44
Tableau 1.4.15 : Matrice des coefficients de corrélation obtenue pour les Argiles vertes de Romainville de l'Est	45
Tableau 1.4.16 : Matrice des coefficients de corrélation obtenue pour les Argiles vertes de Romainville de l'Ouest	45
Tableau 2.2.1 : Mesure de la teneur en eau avant et après essai de succion au papier-filtre	48
Tableau 2.2.2 . Solutions salines saturées utilisées	50
Tableau 2.3.1 : Méthode osmotique-échantillons d'Argiles vertes de Romainville.....	51
Tableau 2.6.1 : Paramètres des matériaux étudiés selon le modèle de van Genuchten	67
Tableau 3.3.1 : Résultats du gonflement libre de l'ensemble des échantillons pour différentes contraintes apportées par le piston (Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est : carrière de Villeparisis – Le Pin)	73
Tableau 3.3.2 : Résultats du gonflement libre de l'ensemble des échantillons pour différentes contraintes apportées par le piston (Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest : carrière de Cormeilles-en-Parisis)	74

Tableau 3.3.3 : Pression de gonflement pour les Argiles vertes et les Marnes bleues de l'Est (Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation)	90
Tableau 3.3.4 : Pression de gonflement pour les Argiles vertes de l'Ouest (Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation)	91
Tableau 3.4.1 : Modèles de prévision testés pour le gonflement des sols étudiés	95
Tableau 3.4.2 : Taux de gonflement mesuré et estimé pour les sols étudiés dans l'état naturel.....	97
Tableau 3.4.3 : Pression de gonflement mesurée et estimée pour les sols étudiés dans l'état naturel.....	99
Tableau 4.3.1 : Paramètres des échantillons EAVR-0 soumis à des essais cycliques	102
Tableau 4.4.1 : Paramètres des échantillons EMBA-1 soumis à des essais cycliques	105
Tableau 4.4.2 : Paramètres des échantillons EMBA-01 soumis à des essais cycliques	108
Tableau 4.4.3 : Paramètres des échantillons EAVR-C soumis à des essais cycliques	110
Tableau 5.1.1 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes de matériau remanié (oui et non signalent si la fissuration est observée)	118
Tableau 5.1.2 : Caractéristiques des fissures observées sur la surface des échantillons d'EMBA-1	124
Tableau 5.2.1 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons EAVR-0 intact et remanié	168
Tableau 5.2.2 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons EAVR-1 et EAVR-C.....	171
Tableau 5.2.3 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons WAVR-0	173
Tableau 5.2.4 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons WAVR-1	173
Tableau 5.2.5 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil	176
Tableau 5.2.6 : Variation de volume des différentes familles de rayons d'accès de pore (Marnes bleues d'Argenteuil)	177
Tableau 5.2.7 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons d'Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil soumis à des sollicitations hydriques cycliques	183

Introduction générale

Le réchauffement climatique est annoncé par le GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) comme une quasi certitude, avec des répercussions sur les phénomènes de sécheresse. Il est donc nécessaire, par mesure de précaution, d'accélérer les mesures de prévention et de protection actuellement en cours, afin de diminuer, à l'avenir, les effets de la sécheresse. D'une façon générale, d'après ce rapport, la concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter dans l'atmosphère, principalement du fait des activités humaines (IPCC-GIEC, 2007). L'impact sur le bilan radiatif de la Terre est important. Le climat change, avec pour la période 1995-2006 : 11 des 12 années les plus chaudes depuis 1850 et une augmentation de la température moyenne à la surface du globe de 0,76°C depuis 1860, dont 0,74°C depuis 1900 et 0,20°C depuis 1990. D'ici 2100, suivant les différents scénarios possibles quant aux émissions de gaz à effet de serre, selon les prévisions des modèles et hors événement naturel exceptionnel, la température moyenne de l'air à la surface du globe devrait augmenter de 1,1 à 6,4°C par rapport à 1990. De plus des changements significatifs pourraient apparaître quant aux caractéristiques de variabilité des climats, s'agissant de la fréquence et de l'intensité de certains événements climatiques extrêmes : précipitations et sécheresse (IPCC-GIEC, 2007). Des périodes de sécheresse de longueur inhabituelle sous les latitudes des pays tempérés sont ainsi vraisemblables, avec en conséquence des *processus de retrait-gonflement des sols argileux, à l'origine des dommages au bâti*, processus déjà très préoccupants en Europe, en France et en particulier en Ile-de-France.

Les processus de retrait-gonflement des sols argileux préoccupent depuis de longues années les géotechniciens et les professionnels du bâtiment. Ce phénomène, qui fait partie des catastrophes dites « naturelles », présente la sinistralité la plus coûteuse en France. Dans un tel contexte, son étude s'avère essentielle pour tenter de limiter les dommages au bâti. C'est pourquoi, ce travail de thèse a été entrepris. Par ailleurs, l'occurrence des phénomènes climatiques extrêmes et la perspective d'un changement climatique global pouvant entraîner des sécheresses exceptionnelles justifie le développement de travaux de recherche.

Ces processus résultent de facteurs climatiques, géologiques et géotechniques, mais des facteurs anthropiques aggravants en rapport avec le bâti et son environnement immédiat sont également connus. Du point de vue géologique, le phénomène de retrait-gonflement trouve son origine dans la nature de la fraction argileuse des sols ainsi que dans la microstructure ou texture des sols. En particulier, une forte teneur en argiles de type smectite a pour conséquence des phénomènes de gonflement-retrait du sol en fonction des variations de teneur en eau imposées par les conditions environnementales. Ces variations sont essentiellement liées aux interactions entre le sol, le climat et la végétation dans l'environnement immédiat des constructions.

Ainsi, les vertisols, constituant une catégorie importante parmi les sols sensibles au retrait-gonflement, représentent environ 2,5 % de la surface des terres émergées et sont présents principalement dans les zones climatiques où de fortes variations saisonnières de précipitation et de température sont observées (Grunwald, 2004, cité par Tessier et al, 2006). On les trouve ainsi en Australie, en Inde, aux Etats-Unis, au Canada, en Afrique (et particulièrement en Ethiopie et dans la zone sub-saharienne), en Amérique du Sud (au Brésil, au Venezuela, au Paraguay et en Bolivie), au Mexique, sur le pourtour méditerranéen (en Algérie, au Maroc,

etc.) et au Moyen-Orient, etc. Ainsi, la dégradation des ouvrages due au retrait-gonflement des sols argileux n'est pas un problème propre à la France ni à l'Europe (Grande-Bretagne, Espagne, etc.). Il touche aussi bien des bâtiments, que des remblais routiers ou des barrages dans beaucoup de pays du monde.

Dans tous les pays qui ont des problèmes de sol gonflants, le coût annuel des dégâts lié à la sécheresse géotechnique est estimé très supérieur à celui de toutes les autres catastrophes naturelles (Tessier et al, 2006). Ainsi, aux Etats-Unis, ce coût annuel a été estimé à 2 milliards de dollars par an, ce qui est plus que les coûts cumulés des dommages dus aux tornades, aux ouragans, aux tremblements de terre et aux inondations réunis (source: NRCS, Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture).

Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux engendre chaque année sur le territoire français des dégâts considérables aux bâtiments. En France métropolitaine, il a été mis en évidence à l'occasion de la sécheresse de l'été 1976 et a pris une réelle ampleur lors des périodes sèches des années 1989-91 et 1996-97, puis dernièrement au cours de l'été 2003. Les désordres provoqués par le phénomène de retrait-gonflement constituent désormais le deuxième poste indemnisé dans le cadre du régime des catastrophes naturelles, derrière les inondations. Ainsi, en 2002, le coût cumulé des indemnités versées par les assurances au titre des dégâts liés au retrait-gonflement des argiles s'élevait à plus 3,3 milliards d'euros (Vincent, 2003). En plus de ce chiffre global, l'évaluation du coût moyen des sinistres par les assureurs a été estimée à environ 10 000 € par ouvrage.

Selon les données communiquées par la Caisse Centrale de Réassurance en octobre 2003 (<http://www.argiles.fr/>), la région parisienne est tout particulièrement concernée par le phénomène de retrait-gonflement puisque les sept départements de la région Ile-de-France (hors ville de Paris) font partie des dix-sept départements français pour lesquels les coûts cumulés d'indemnisation pour des sinistres liés au retrait-gonflement sont les plus élevés. Selon ce critère, le département des Yvelines est le plus touché, suivi de près par les départements de Seine-et-Marne et de l'Essonne.

Objectifs et organisation de la thèse

Ce travail de recherche s'est déroulé principalement dans le cadre du projet « Aléa et Risque Sécheresse » soutenu par la Fondation MAIF, ainsi que dans le cadre du projet ANR-RGCU ARGIC (Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) et du projet « Sécheresse géotechnique et bâti » du R2DS (Réseau de Recherche sur le Développement Soutenable), soutenu par la région Ile-de-France.

L'objectif général de ce travail de thèse est d'apporter une contribution à la compréhension et à la caractérisation du retrait-gonflement de deux formations géologiques du Bassin parisien particulièrement sensibles à ce phénomène, sélectionnées pour cette étude : les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil. L'étude comporte plus particulièrement, d'une part, une caractérisation minéralogique, géotechnique, hydrique et microstructurale des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil ; d'autre part, des essais hydromécaniques cycliques couplés à l'analyse microstructurale afin d'étudier le comportement et l'évolution de ces matériaux au cours de sollicitations hydriques cycliques.

Les travaux sont présentés sous forme de cinq chapitres et un travail bibliographique présentant un état de l'art sur ce sujet est joint en annexe. L'étude bibliographique s'est

focalisée sur l'identification des sols gonflants et les résultats majeurs concernant leur structure interne, l'interaction sol-eau, le processus de retrait-gonflement au niveau microscopique et macroscopique, les rôles de différents paramètres sur le processus de retrait-gonflement, l'influence du processus de retrait-gonflement sur la structure interne des sols gonflants, le rôle des sollicitations hydriques cycliques et la fissuration. Cette étude bibliographique est complétée en présentant les différentes techniques expérimentales de caractérisation de l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement.

Le premier chapitre du mémoire est consacré à la présentation des sites de prélèvements et des matériaux étudiés. La localisation géographique et le contexte géologique des sites de prélèvement sont décrits brièvement. Puis, les caractérisations minéralogiques et les paramètres d'identification géotechnique de ces sols sont présentés.

Les résultats obtenus sur la rétention d'eau sont analysés dans le deuxième chapitre. Tout d'abord, la procédure expérimentale développée pour établir les courbes de rétention d'eau a été décrite. Les techniques de contrôle et de mesure de succion employées sont présentées. Dans le cadre du présent travail, on a adopté la technique osmotique et la technique de contrôle de succion par phase vapeur. Ensuite, les résultats obtenus sur les essais sont analysés. Les courbes de rétention des Argiles vertes de Romainville, des Marnes bleues d'Argenteuil, et des Argiles vertes de Romainville remaniées et reconstituées sont exposées. Les courbes de l'évolution de l'indice des vides et du degré de saturation en fonction de la succion sont également présentées et discutées. Enfin, ce chapitre est complété par une présentation des paramètres du modèle de van Genuchten.

L'étude expérimentale sur le comportement mécanique des matériaux est présentée dans le troisième et quatrième chapitre. Dans le troisième chapitre, après la présentation du protocole d'essais, on analyse le comportement volumique (le gonflement) des matériaux intacts et remaniés sous hydratation. Les résultats d'essais de gonflement libre sont présentés et les effets de la densité sèche, de la teneur en eau, et de la minéralogie, sont analysés. Puis, les résultats de modélisation du gonflement réalisé en se basant sur un modèle empirique sont exposés. Ensuite, les valeurs de pression de gonflement obtenues par la méthode du gonflement libre et à volume constant sont présentées et discutées. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus sont comparés à ceux estimés par des modèles empiriques existants dans la littérature.

Dans le quatrième chapitre, le comportement des matériaux étudiés sous sollicitations hydriques cycliques est étudié. Après la présentation du protocole d'essai, on analyse l'évolution du taux de gonflement et de retrait des matériaux intacts au cours des cycles imbibition totale-séchage complet.

Le cinquième chapitre présente les aspects structuraux et microstructuraux du retrait-gonflement des sols étudiés. Après la présentation du protocole d'essai, les résultats expérimentaux obtenus sur les matériaux intacts et remaniés au cours de la dessiccation sont exposés et discutés. Puis les résultats des études microstructurales réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) et par porosimétrie au mercure pour des sols naturels intacts, remaniés, après gonflement et après des cycles de séchage-gonflement sont présentés et discutés.

Une conclusion générale présente les principaux résultats établis et propose quelques perspectives pour des approfondissements de cette recherche.

L'ensemble des résultats obtenus au cours de cette étude a fait l'objet de plusieurs présentations et publications dont la liste est donnée ci-dessous :

Articles

Geremew Z., Audiguier M., Cojean R. (2009). Analyse du comportement d'un sol argileux sous sollicitations hydriques cycliques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68: pp. 421-436.

Geremew Z., Audiguier M., Cojean R. (2008) - Comportement de sols argileux soumis a des sollicitations hydriques cycliques. *Symposium international Sécheresse et Construction*, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris, pp. 245-256.

Audiguier M., **Geremew Z.**, Cojean R. (2008) - Relation entre les microstructures de deux sols argileux de la région parisienne et leur sensibilité au retrait-gonflement. *Symposium international Sécheresse et Construction*, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris, pp. 235-244.

Audiguier M., **Geremew Z.**, Laribi S., Cojean R. (2007) - Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp.67-82.

Laribi S., Cojean R., Audiguier M., Grambin-Lapeyre C., **Geremew Z.** (2007) - Essai d'adsorption de bleu de méthylène : influence de paramètres du protocole expérimental sur la valeur au bleu en fonction de la minéralogie des argiles. *Revue Française de Géotechnique*, n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 83-90.

Communication orale

Geremew Z., M. Audiguier, Cojean R. (2006) Caractérisation minéralogique, texturale et géotechnique de deux sols argileux sensibles au retrait- gonflement. Séminaire Physico-chimie et propriétés mécaniques des sols et roches, LCPC Nov. 06/2006, Paris.

Participation aux rapports intermédiaires et rapports finals de projets de recherche

Cojean R., Audiguier M., **Geremew Z.**, Laribi S., Thénevin I., Cui Y.J., Tang A.M., Ta A.N., Heck J.-V., Taillefer N., Deffontaines B., Kaveh F., Fruneau B., (2009). Rapport final du projet « Aléa et risque sécheresse ». Fondation MAIF. Rapport final, 397 p. Annexes, 439p. Synthèse de la recherche, 52p. Armines. Janvier 2009.

Vincent M., Cojean R., Fleureau J.-M., Cui Y. J., Jacquard C., Kazmierczak J.-B., Masrouri F., Tessier D., Alimi-Ichola I., Magnan J.-P., Blanchard M., Fabre D., Pantet A., Audiguier M., Plat E., Souli H., Taïbi S., Tang A.-M., Morlock C., Maison T., Mrad M., Bréda N., Djeran-Maigre I., Duc M., Soubeyroux J.-M., Denis A., Proust D., **Geremew Z.**, Le Roy S., Dumont M., Hemmati S., Nowamooz H., Coquet Y., Pothier C., Makki L., Chrétien M., Fontaine C. (2009) – Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait-gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) – Projet ANR-05-PRGCU-005. Rapport BRGM/RP-57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers.

Chapitre 1 Analyse des Matériaux Etudiés

1.1 Introduction

En France, depuis 1976, des périodes de sécheresse prolongée, accompagnées de déficits hydriques importants ont mis en évidence une grande vulnérabilité des maisons individuelles fondées sur des sols argileux (CEBTP, 1991). En effet, les processus de retrait-gonflement de certains sols argileux ont provoqué des mouvements de terrain à l'origine de phénomènes de fissuration de plusieurs milliers de pavillons. L'Ile-de-France est une des régions les plus touchées.

Le sous-sol du bassin de Paris est formé principalement d'alternances de formations calcaires, gypseuses, sableuses, argileuses ou marneuses. Parmi ces dernières, deux sont particulièrement sensibles au phénomène de retrait-gonflement. Il s'agit des Marnes bleues d'Argenteuil et de l'Argile verte de Romainville. Elles sont présentes sur l'ensemble de l'Ile-de-France à des profondeurs variables qui résultent essentiellement du contexte géomorphologique. La sensibilité de ces formations au retrait-gonflement est d'autant plus grande qu'elles se présentent à l'affleurement, sous faible recouvrement, ou en situation de versant. Ces deux formations font l'objet de cette étude.

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais de caractérisation conduits sur ces deux formations argileuses. Nous présentons les caractéristiques minéralogiques et géotechniques de ces formations.

1.2 Localisations géographiques et stratigraphiques des échantillons prélevés et étudiés

1.2.1 Localisations géographiques des sites de prélèvement

Les sols étudiés sont prélevés dans deux carrières de la région parisienne. L'une est située à environ 25 km au Nord-Est de Paris sur les communes de Villeparisis et Le Pin (département de Seine-et-Marne) : *la carrière de Villeparisis-Le Pin* (Figure 1.2.1). L'autre est située à environ 35 km au Nord-Ouest de Paris sur la commune de Cormeilles-en-Parisis (département du Val-d'Oise) : *la carrière de Cormeilles-en-Parisis* (Figure 1.2.1).

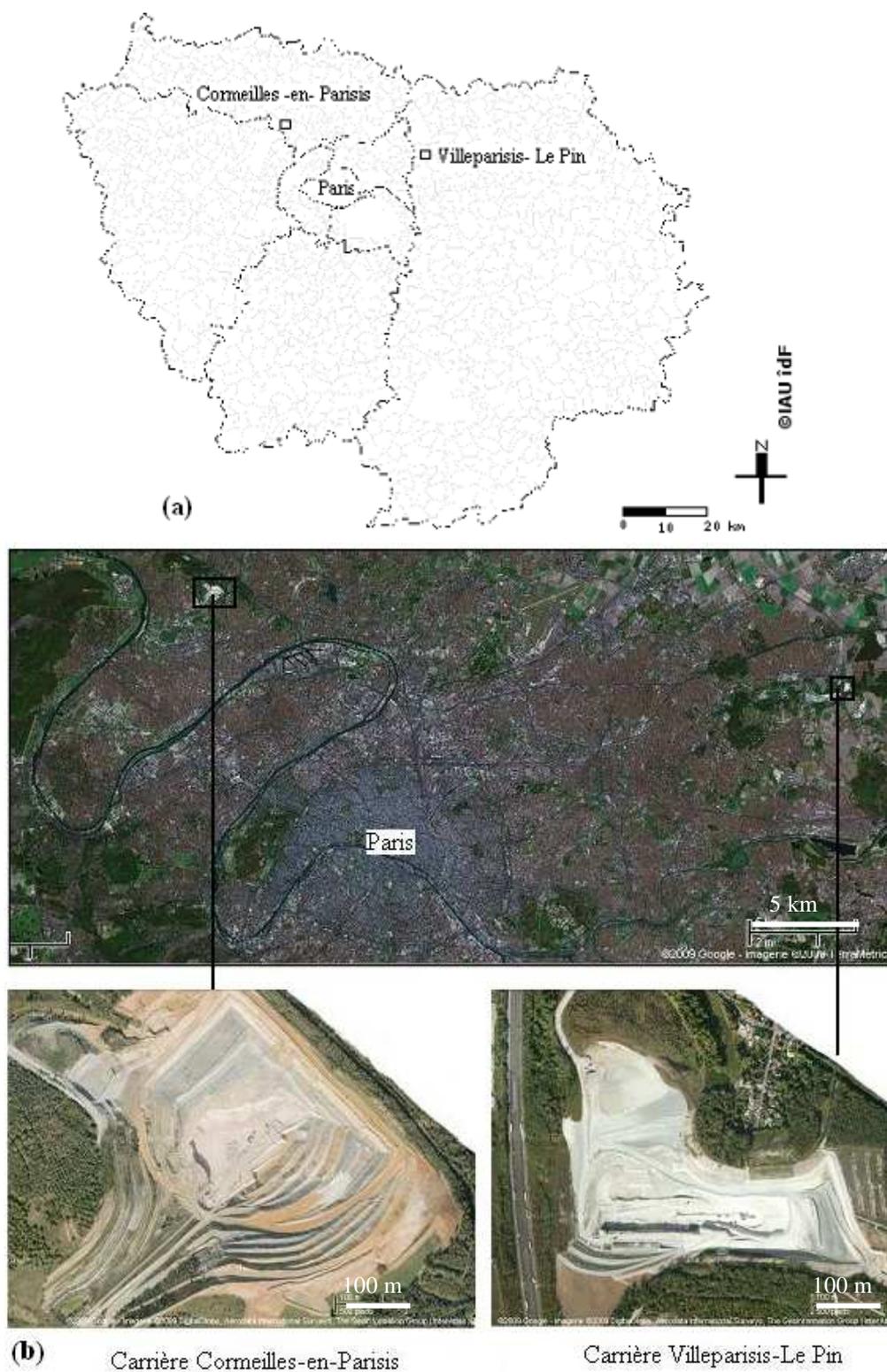


Figure 1.2.1 : Localisation des sites des 2 carrières par images satellite (d'après Google imagerie 2009)

1.2.2 Géologie et Stratigraphie des sites de prélèvement

Les sols étudiés proviennent du bassin de Paris dont la géologie est constituée essentiellement de terrains d'âge tertiaire (Figure 1.2.2).

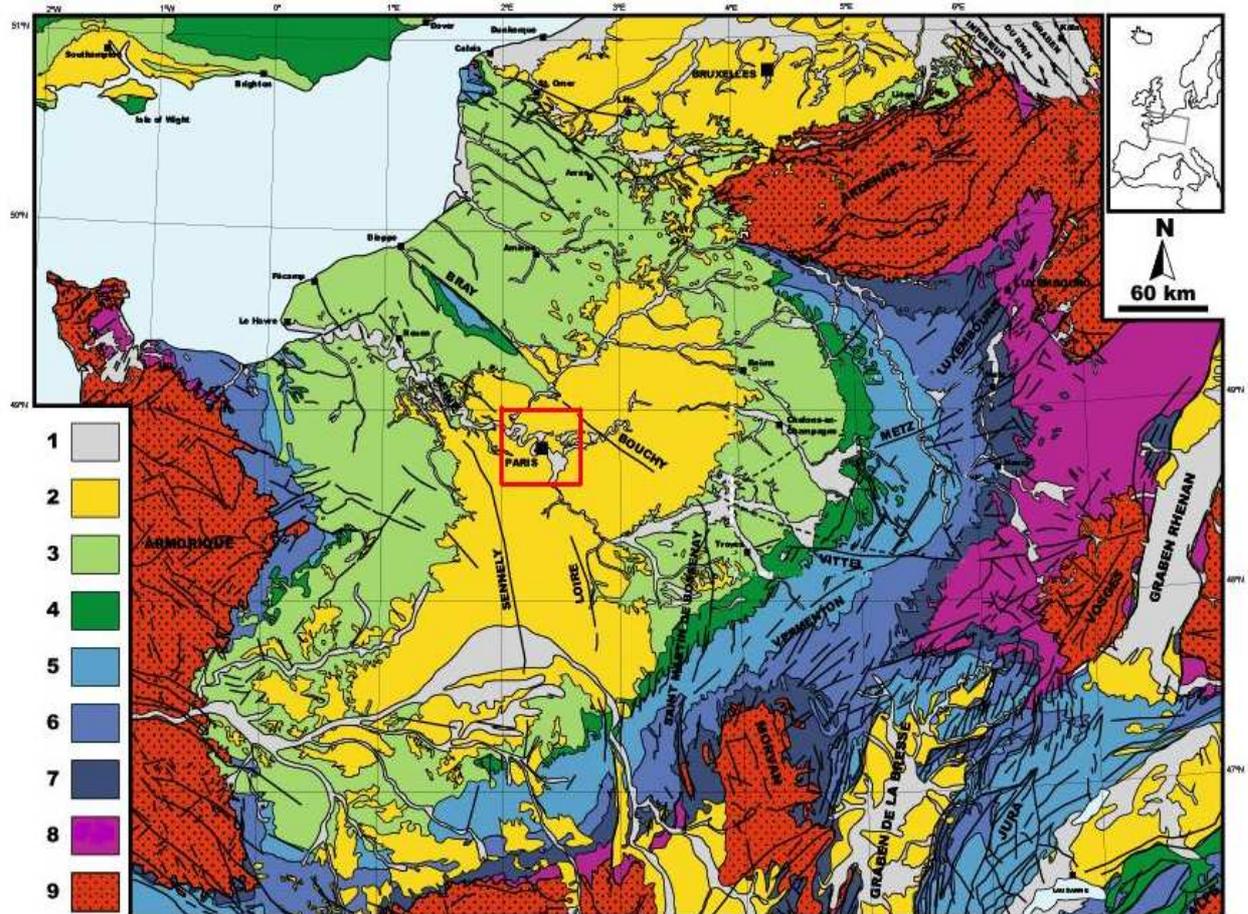
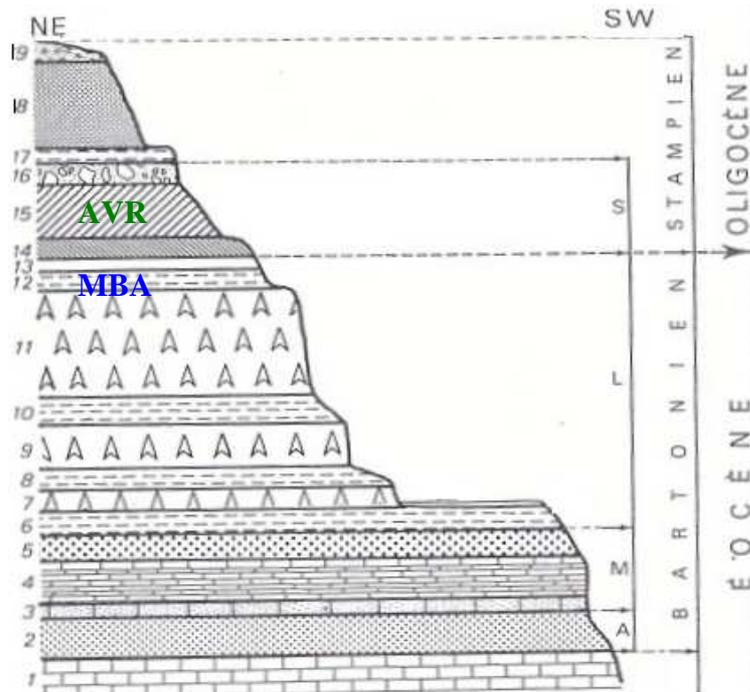


Figure 1.2.2 : Carte géologique du bassin de Paris, d'après la Carte géologique de la France au 1/1.000.000 (Chantraine et al., 1996) ; 1) Quaternaire et alluvions récentes, 2) Tertiaire, 3) Crétacé supérieur, 4) Crétacé inférieur, 5) Jurassique supérieur, 6) Jurassique moyen, 7) Jurassique inférieur, 8) Trias, 9) Paléozoïque et socle. Le cadre rouge représente la zone d'étude.

La coupe lithologique montre une alternance des formations calcaires, gypseuses, marneuses et argileuses (Figure 1.2.3). Les deux sites de prélèvements montrent une litho-stratigraphie comparable.



1) Calcaire Grossier, 2) Sables de Beauchamp, 3) Calcaire du Ducy et grès de Mortefontaine, 4) Calcaire de Saint-Ouen, 5) Sables de Monceau, 6) Marnes à *Pholadomya ludensis*, 7) Gypse, 3^e masse, 8) Marnes à Lucines, 9) Gypse pied-d'alouette (2^e masse), 10) Marnes d'Entre-deux-Masses, 11) Gypse saccharoïde (Haute-masse), 12) Marnes bleues d'Argenteuil, 13) Marnes blanches de Pantin, 14) Glaises brunes à Cyrènes, 15) Argiles vertes de Romainville, 16) Caillasses d'Orgemont et calcaire de Sannois, 17) Marnes à huîtres, 18) Sables de Fontainebleau, 19) Argiles à meulières de Montmorency et limon lœssique.
 A : Auversien, M : Marinésien, L : Ludien, S : Sannoisien

Figure 1.2.3 : Coupe géologique du bassin de Paris (modifié d'après Pomerol et Feugueur 1986)

Les séries sédimentaires présentes dans la carrière de Villeparisis-Le Pin se succèdent du haut vers le bas de la façon suivante :

- Formations quaternaires
- Argiles vertes de Romainville (4 à 5 m)
- Glaises à Cyrènes (1 à 2 m)
- Marnes blanches de Pantin (4 à 5 m)
- Marnes bleues d'Argenteuil (avec une épaisseur de 8 à 10 m)
- Haute masse de gypse

Dans la carrière de Cormeilles-en-Parisis la succession des séries sédimentaires est plus complète. Elles se présentent de haut en bas comme suit (Figure 1.2.3) :

- Formations quaternaires
- Argiles à meulières de Montmorency et limon lœssique (environ 20 m)
- Sables de Fontainebleau (18 à 20 m)
- Marnes à huîtres (6 à 7 m)
- Caillasses d'Orgemont et calcaire de Sannois (4 à 5 m)
- Argiles vertes de Romainville (4 à 6 m)
- Glaises brunes à Cyrènes (1 à 2 m)
- Marnes blanches de Pantin (6 à 7 m)
- Marnes bleues d'Argenteuil (8 à 9 m)
- Haute masse de gypse

Les épaisseurs données sont une estimation et non une mesure précise.

Les deux formations argileuses du bassin de Paris étudiées sont les Marnes bleues d'Argenteuil (MBA) appartenant au Ludien supérieur, étage de l'Eocène supérieur, et l'Argile verte de Romainville (AVR) du Rupélien inférieur (anciennement Stampien), étage de l'Oligocène inférieur. Des études récentes menées par Donsimoni et al. (2003, 2004, 2006) ont placé ces formations dans la catégorie des sols argileux à forte susceptibilité au retrait-gonflement, à partir de critères tenant compte de la composition minéralogique de la phase argileuse et de caractéristiques géotechniques simples. Ces mêmes critères ont servi à établir des cartes de susceptibilité.

Les deux matériaux résultent d'une sédimentation argilo-carbonatée, laguno-lacustre pour les Marnes bleues d'Argenteuil et laguno-marine pour les Argiles vertes de Romainville. Ils correspondent à des dépôts en milieu peu profond, confiné et réducteur (MBA principalement) avec apport de minéraux détritiques (quartz, feldspaths, micas) et accessoirement formation de minéraux évaporitiques (gypse dans MBA essentiellement) (Audiguier et al, 2008).

Dans les deux sites de prélèvement, Les Marnes bleues d'Argenteuil reposent sur la Haute masse de gypse. Elles sont de couleur brun-jaunâtre à la base, puis essentiellement gris-bleu au-dessus, d'où l'appellation de « Marnes bleues ». Cette formation argileuse est fréquemment interrompue par des niveaux carbonatés (de 7 à 10 cm d'épaisseur) et par des intercalations millimétriques sableuses et ligniteuses. Elles présentent une structure feuilletée (plus particulièrement dans la carrière de Villeparisis-Le Pin). Elles sont généralement indurées et les réseaux de fissures sont peu fréquents. Les rares fissures observées sont verticales et sans remplissage.

Cette formation affleure sur une surface de 221,64 km² en Seine-et-Marne, soit 3,75 % de la superficie du département (Donsimoni et al. 2006), et sur une surface de 16,40 km² dans le Val d'Oise, soit 1,32 % de la superficie du département (Donsimoni et al. 2004).

Les Argiles vertes de Romainville, de couleur verte parfois brunâtre, très plastiques, présentent à la partie supérieure une intercalation de bancs minces silteux (3-7 cm). Elles sont découpées par des fissures de dessiccations (mud-cracks) et des surfaces de cisaillement (slickensides). Les fissures verticales sont dominantes avec 1 à 2 cm d'ouverture (en situation de front de taille) et généralement sans remplissage. Des fissures fermées sont marquées par des traces d'oxydation dans le massif. Dans la partie inférieure, les Argiles vertes de Romainville sont beaucoup plus homogènes, mais contiennent cependant des nodules calcaireux (de 4 à 15 cm de diamètre).

Dans la carrière de Cormeilles-en-Parisis (Figure 1.2.4), la partie inférieure est de couleur vert-foncée, homogène et fissurée, et recouverte par un banc carbonaté de quelques décimètres d'épaisseur, non visible dans la carrière de Villeparisis-Le Pin. Vient ensuite un niveau d'environ 0,70 m d'épaisseur d'Argile verte formant la partie supérieure de la formation (Figure 1.2.4c)

Cette formation affleure sur une surface de 260,85 km² en Seine-et-Marne, soit 4,41 % de la superficie de département (Donsimoni et al. 2006), et sur une surface de 21,55 km² dans le Val d'Oise, soit 1,82 % de la superficie de département (Donsimoni et al. 2004).

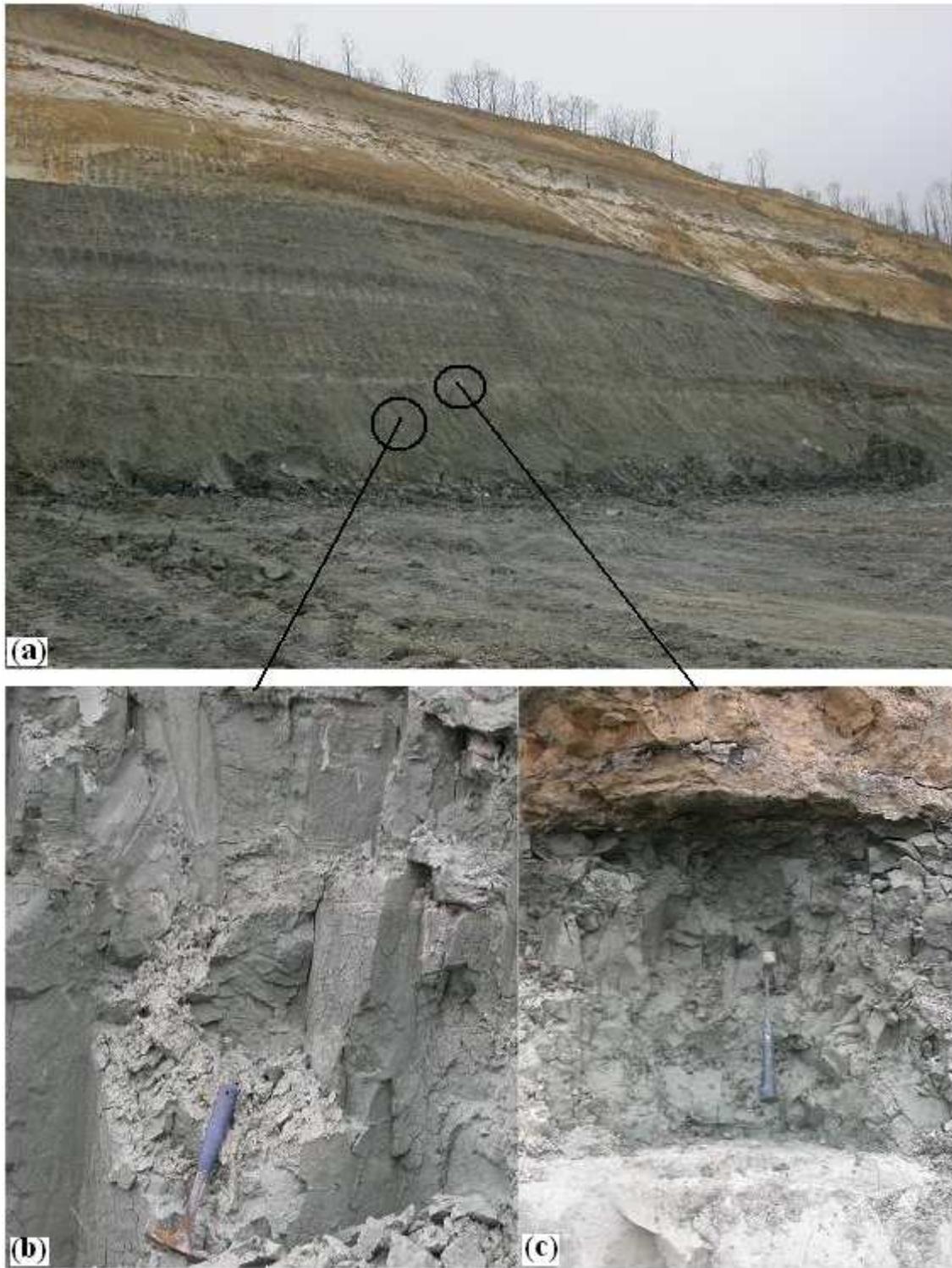


Figure 1.2.4 : (a) Front de taille de l'Argile verte de Romainville dans la carrière de Cormeilles-en-Parisis (avril 2008) ; (b) Partie inférieure du banc d'Argile verte de Romainville ; (c) partie supérieure du banc d'Argile verte de Romainville, avec à la base présence d'un banc calcaire décimétrique (partie blanche) et au sommet le contact avec le banc des caillasses d'Orgemont

1.3 Présentation des échantillons étudiés

Une série de prélèvements a été réalisée durant le mois d'avril 2005 (période sèche) dans la carrière de Villeparisis-Le Pin, et durant le mois de février 2006 (période humide) dans la carrière de Cormeilles-en-Parisis.

Afin de disposer d'échantillons dont les caractéristiques hydriques soient les plus proches possibles des conditions in situ au moment du prélèvement, les blocs prélevés ont été paraffinés et placés dans une salle où la température est maintenue à 20°C. Ce type de conditionnement permet de préserver les matériaux des échanges hydriques avec l'atmosphère.

Deux séries d'échantillons d'Argiles vertes de Romainville, auxquelles s'ajoutent, pour la carrière de Villeparisis-Le Pin, une série d'échantillons prélevés dans des colluvions issues de cette formation et deux séries d'échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil sont étudiées. Elles sont référencées en fonction du site et du niveau de prélèvement. Une présentation des échantillons est faite dans le Tableau 1.3.1 et le Tableau 1.3.2.

Tableau 1.3.1 : Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est de Paris (carrière de Villeparisis-Le Pin, 77)

Nom de l'échantillon	Description	Niveaux/profondeur de prélèvement
E-AVR-1	Argiles vertes, hétérogènes, fissurées, fréquemment interrompues par des niveaux silteux	Partie supérieure (8 – 10 m)
E-AVR-0	Argiles vertes, beaucoup plus homogènes, fissurées	Partie inférieure (12 – 15 m)
E-AVR-C	Argiles vertes remaniées (colluvions), hétérogènes	Partie supérieure
E-MBA-1	Marnes gris-bleu, feuilletées	Partie supérieure (25 – 30 m)
E-MBA-01	Marnes gris-bleu, feuilletées	Partie supérieure (30 – 32 m)
E-MBA-0	Marnes grises, très fermes, massives	Partie inférieure (32 – 35 m)

Tableau 1.3.2 : Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest de Paris (carrière de Cormeilles-en-Parisis, 95)

Nom de l'échantillon	Description	Profondeur	Niveaux de prélèvement
W-AVR-1	Argiles vertes, plastiques, fissurées, hétérogènes, présentant des intercalations de lits fins silteux	60 – 65 m	Partie supérieure
W-AVR-0	Argiles vertes, plastiques, beaucoup plus homogènes, fissurées		Partie inférieure
W-MBA-1	Marnes gris-bleu	80 m	Partie supérieure
W-MBA-0	Marnes grises, très fermes, massives		Partie inférieure

En parallèle à ces premiers prélèvements, une campagne d'échantillonnage des Argiles vertes de Romainville a été réalisée sur les deux sites et sur toute la hauteur de la formation à raison d'un prélèvement tous les 10 à 20 cm. Le descriptif est donné dans le Tableau 1.3.3 et le Tableau 1.3.4.

La base des deux séries de prélèvement correspond au contact glaises à Cyrènes (G à C) - Argiles vertes de Romainville, les identifications géotechniques et les descriptions des logs font apparaître des niveaux repères plus riches en carbonates dans les deux formations à des cotes identiques par rapport à la base de la formation montrant ainsi une continuité de faciès entre l'Est et l'Ouest du Bassin parisien.

Tableau 1.3.3 : Log de la formation des Argiles vertes de Romainville de Villeparisis-Le Pin : descriptif de chaque prélèvement

Log Argiles vertes de Romainville – Villeparisis-Le Pin (E-AVR) (numérotation des échantillons de bas en haut)		
N° Echantillons	Hauteur (cm)	Descriptions
37	370	Bariolées
35	350	Bariolées, présence de lits blancs et de nodules
33	330	Bariolées
31	310	Bariolées
29	290	Plastiques, homogènes, couleur verte, quelques lits ocres
28	280	Plastiques, homogènes, couleur verte
27	270	Hétérogènes, coloration ocre
26	260	Plastiques, couleur verte, présence de slickensides
25	250	Plastiques, homogènes, couleur vert-bleutée
24	240	Plastiques, couleur vert intense, présence de gros nodules (non prélevés)
23	230	Plastiques, couleur verte, homogènes
22	220	Nombreux nodules
21	210	Hétérogènes, moins plastiques, lits blanchâtres
20	200	Lits infra-millimétriques, argiles silteuses
19	190	Vert intense, présence de radicelles
18	180	Plastiques, verdâtres, auréoles ocres
17	170	Idem
16	160	Idem
15	150	Homogènes plastiques, présence de quelques nodules
14	140	Homogènes plastiques
13	130	Homogènes, quelques nodules blancs
12	120	Niveau à nodules et plages carbonatées
11	110	Argiles plastiques, homogènes, couleur gris-verdâtre
10	100	Présence de slickensides
9	90	Idem, taches de couleur rouille à noire
8	80	Idem
7	70	Idem
6	60	Idem
5	50	Argiles plastiques homogènes
4	40	Verdâtres, argilo-silteuses, plastiques
3	30	Niveau rouille à la base. Verdâtres avec quelques passages ocres
2	20	Plus verdâtres, présence de slickensides, quelques passages ocres
1	10	Plus homogènes, verdâtres. Lits grisâtres infracentimétriques
0	0	Transition G à C-AVR couleur gris-ocre, quelques passées rouilles

Tableau 1.3.4 : Log de la formation des Argiles vertes de Romainville de Corneilles-en-Parisis : descriptif de chaque prélèvement

Log Argiles vertes de Romainville – Corneilles-en-Parisis (W-AVR) (numérotation des échantillons de bas en haut)		
N Echantillons	Hauteur (cm)	Descriptions
	+3	
22	440	AV moins plastiques vert-noirâtres
21	420	AV homogènes, traces noires
20	400	Intercalation d'un niveau noir
19	380	AV homogènes, contact avec banc calcaire (3cm)
	350	Calcaire
18	340	Idem
17	320	Idem
16	300	Idem
15	280	Idem
14	260	Idem
13	240	Idem
12	220	Plastiques, homogènes, présence de lits fins carbonatés
11	200	AV plus homogènes, quelques lits espacés
10	180	AV litées, lits espacés
9	160	AV vertes, homogènes très plastiques
8	140	AV litées, lits carbonatés, présence de fossiles
7	120	AV litées, lits fins carbonatés
6	100	Idem
5	80	Idem
4	60	Idem
3	40	AV massives homogènes compactes plastiques, couleur vert foncé
2	20	AV litées, présence de mud-cracks
1	0	Base Argiles vertes litées : intercalations de lits fins carbonatés et de lits argileux plastiques

1.4 Caractérisation minéralogique, géotechnique et mécanique des sols étudiés

1.4.1 Caractérisation minéralogique

La nature minéralogique a été déterminée à partir des spectres de diffraction des rayons X effectués sur un échantillon représentatif du matériau et sur des lames d'argiles de la fraction inférieure à 2 μm .

Dans la première méthode, dite des poudres, le diffractogramme fournit l'identification de tous les minéraux présents (quartz, feldspaths, oxydes et hydroxydes de Fe, carbonates, ainsi que les phyllosilicates, sans possibilité toutefois de bien différencier minéralogiquement les minéraux argileux.

Ainsi la présence de quartz, de feldspaths, de calcite, de dolomite, et des oxydes de fer est identifiée à partir des réflexions principales respectivement à 3,3 Å, 3,25 Å, 3,03 Å, 2,89 Å et 2,71 Å. La fraction totale regroupant minéraux argileux et phyllosilicates est détectée par la présence de raies vers 4,6 Å.

Les lames d'argiles (échantillon orienté) sont préparées par dépôt direct d'une suspension diluée, de particules inférieures à 2 µm, sur une lame de verre dépoli, suivi d'un séchage à l'air libre.

La suspension argileuse préparée pour la diffraction RX a été préalablement décalcifiée et le type des minéraux argileux est déterminé à partir de l'analyse de 3 lames ayant subi des protocoles de préparation différents : séchage à l'air libre (état naturel), glycolage (mise en évidence des argiles gonflantes), et chauffage (destruction de la kaolinite).

Ainsi, l'illite est détectée par la présence de raies à 10 Å, 5 Å et 0,34 Å qui correspondent aux réflexions (001), (002) et (003) d'une phase illitique non affectée par le traitement à l'éthylène-glycol et le chauffage à 550°C (Brindley & Brown, 1980).

La kaolinite est mise en évidence par la présence de réflexions (001) et (002) à 7,15 Å et 3,5 Å à l'état naturel, non modifiées par le traitement à l'éthylène-glycol, mais qui disparaissent après un chauffage à 550°C, (déshydroxylation de la kaolinite).

La composante smectitique est diagnostiquée par la présence, dans le diffractogramme glycolé, d'une réflexion (001) développée aux environs de 17 Å, qui s'établit vers 10 Å après chauffage à 550°C, par départ de l'eau interfoliaire.

La chlorite est détectée par sa réflexion à 14 Å dans le diffractogramme naturel et/ou glycolé et peut être confirmée par la réflexion (003) à 4,7 Å dans le diffractogramme glycolé. L'intensité de la réflexion à 14 Å peut augmenter ou diminuer lors du chauffage, en relation avec son degré de dégradation.

Une analyse semi-quantitative basée sur la hauteur de pics et la cristallinité a été effectuée pour les minéraux principaux. L'abondance relative de chaque minéral identifié est estimée semi-quantitativement en multipliant l'intensité mesurée (après glycolage) par un facteur correctif tenant en compte la forme du pic et donc l'état de cristallisation du minéral (Fagel, 2008).

Par ailleurs, la teneur en carbonates a été mesurée par calcimétrie à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling.

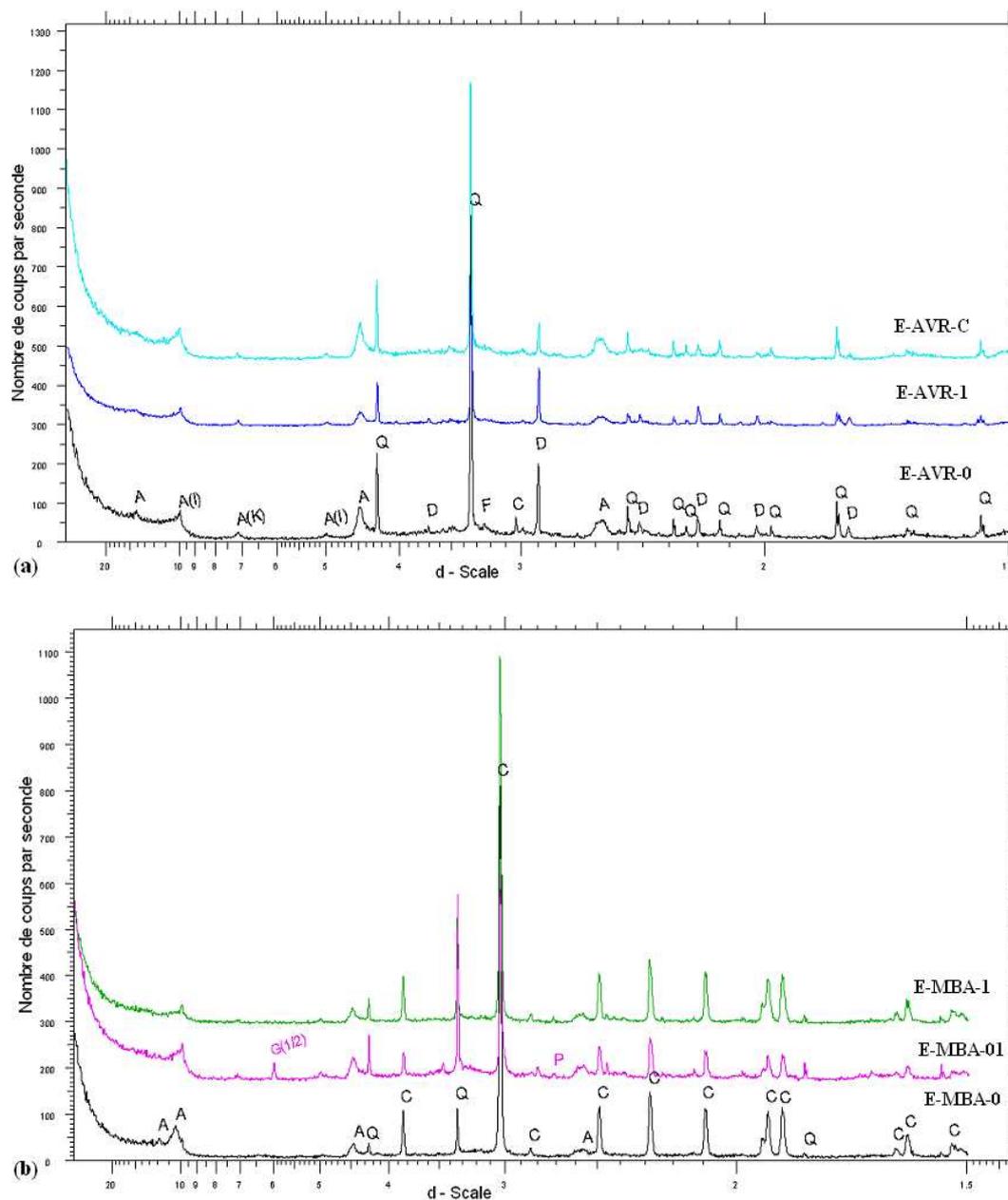
1.4.1.1 Echantillons de l'Est de Paris

Tableau 1.4.1 : Analyse minéralogique des sols de l'est de Paris (Villeparisis-Le Pin)

	E-AVR-C	E-AVR-1	E-AVR-0	E-MBA-1	E-MBA-01	E-MBA-0
Quartz	++	++	++	++	++	+
Calcite	Non ou traces	Non ou traces	Non ou traces	+++	+++	+++
Dolomite	+	++	++	-	-	-
Feldspaths	traces	traces	traces	-	-	-
Minéraux argileux	+++	+++	+++	++	+++	++
Oxydes de fer	-	-	-	traces	traces	-
Minéraux argileux dans la fraction argileuse						
Illite	+++	+++	+++	+++	+++	++
Kaolinite	+	++	++	+	+	-
Smectite et Interstratifiés	++	++	++	++	+++	++
Illite-Smectite						
Argiles fibreuses	-	-	-	-	-	+++

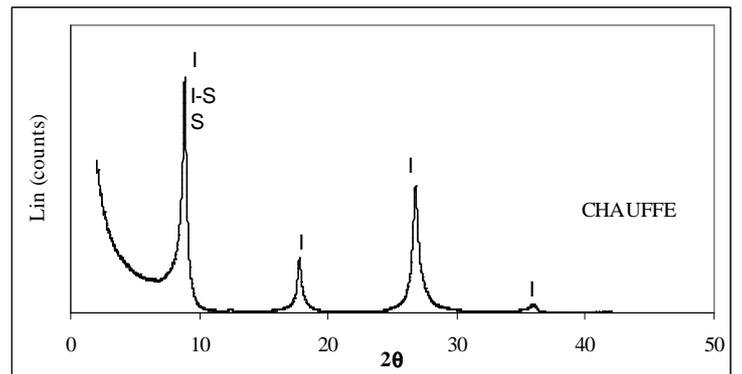
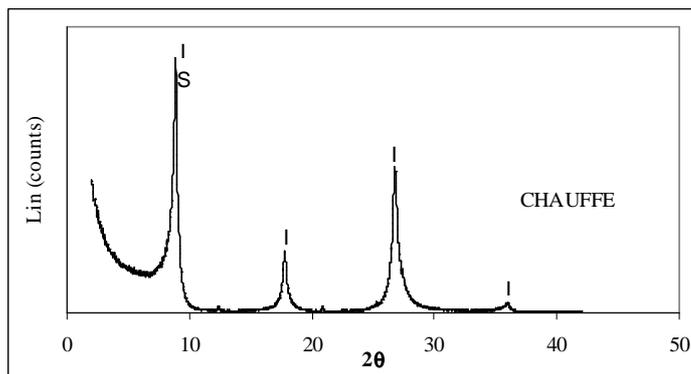
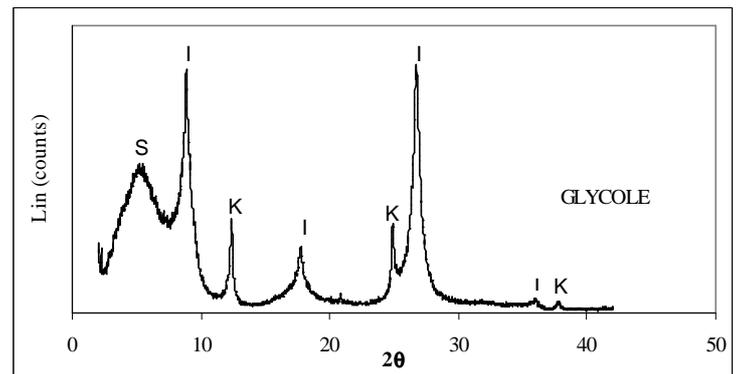
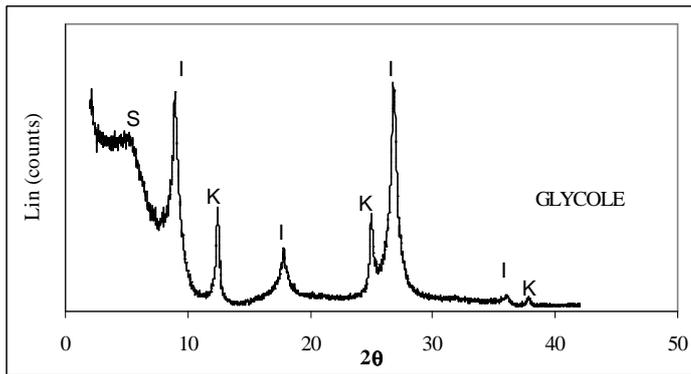
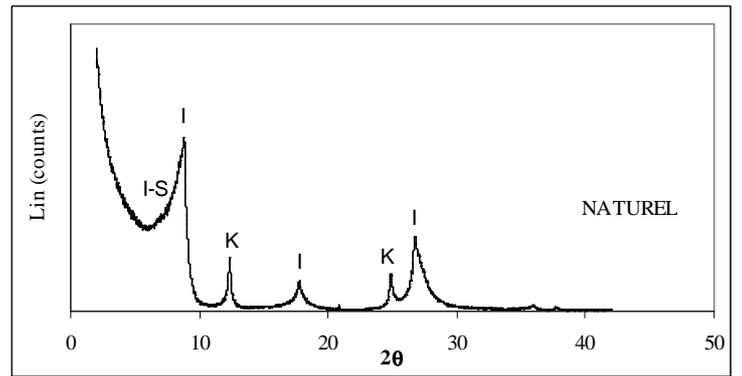
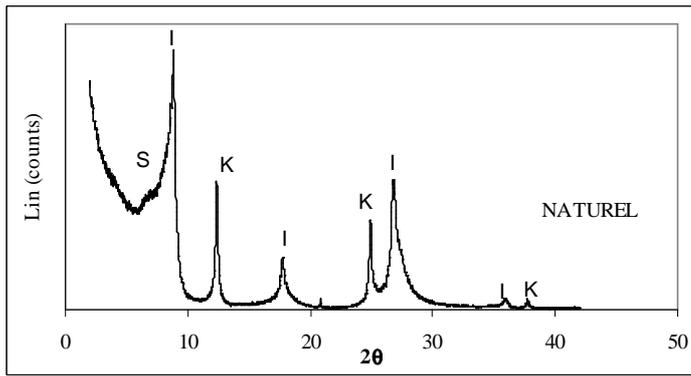
(+++ : très abondant, ++ : abondant, + : peu abondant, - : non décelé)

Les diffractogrammes obtenus, sur les lames de poudres et sur les lames d'argiles sont présentés sur la Figure 1.4.1, la Figure 1.4.2 et la Figure 1.4.3. Le Tableau 1.4.1 résume l'importance relative des minéraux principaux présents dans les échantillons de l'Est ; leur teneur en carbonates est donnée dans le Tableau 1.4.2



(Q=quartz, F=feldspaths, A=argiles, C=calcite, D=Dolomite, G=gypse, P=pyrite)

Figure 1.4.1: Diffractogrammes RX des lames de poudres des échantillons de l'est de Paris : a) Argiles vertes de Romainville inférieures, supérieures, et remaniées (Colluvions) ; b) Marnes bleues d'Argenteuil inférieures et supérieures

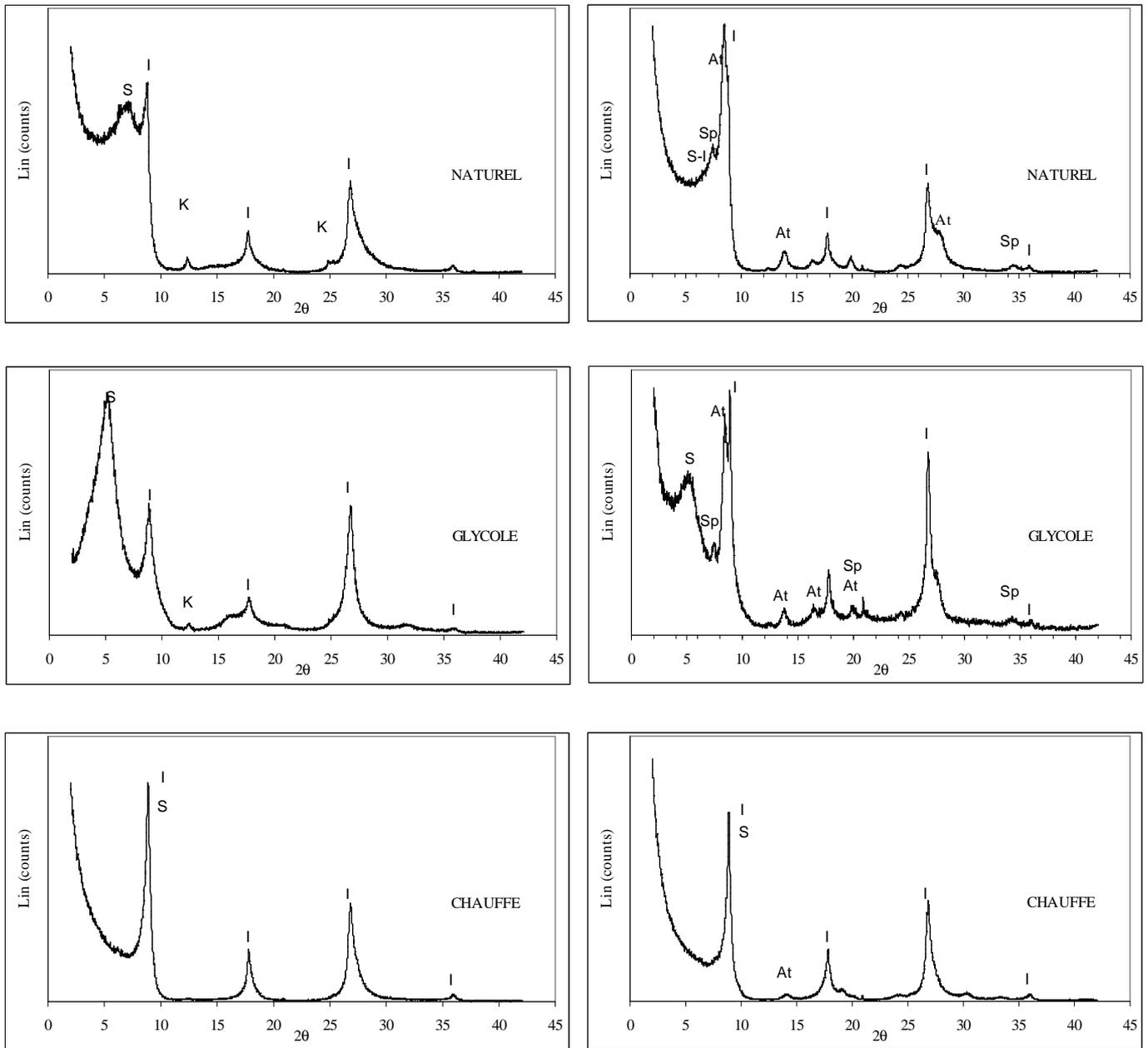


(I= illite, K=kaolinite, S=smectite)

(a)

(b)

Figure 1.4.2 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons d'Argiles vertes de Romainville de l'est de Paris ; a) E-AVR-0, b) E-AVR-1

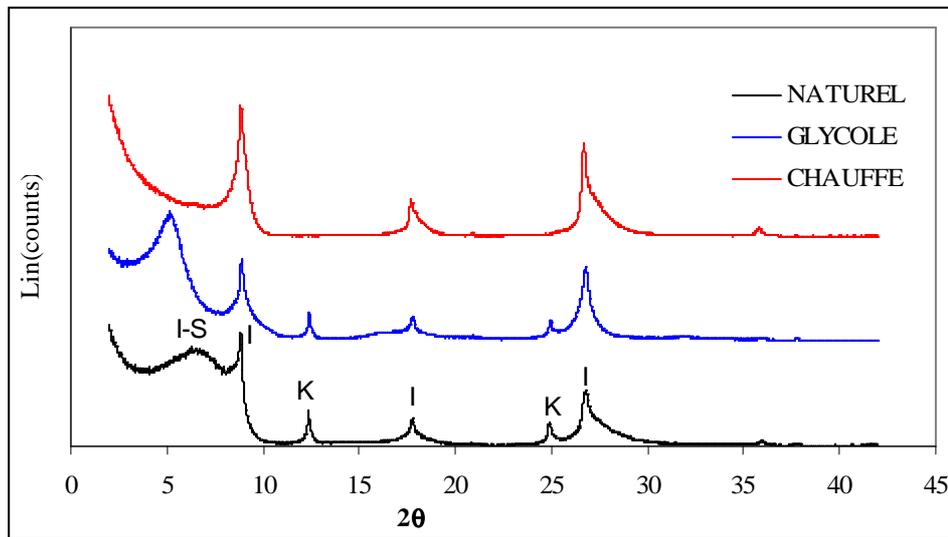


(I=illite, K=kaolinite, S=smectite, At=attapulgite, Sp=sepiolite)

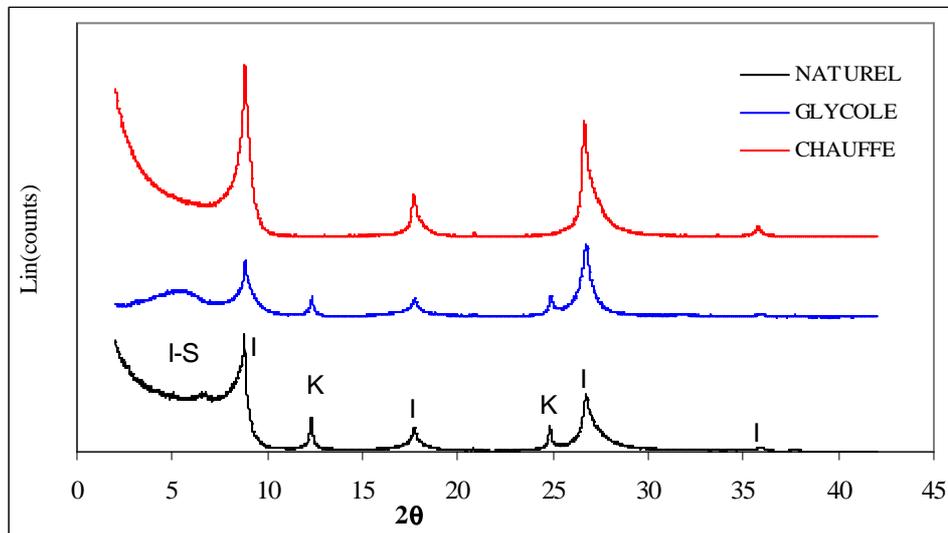
(a)

(b)

Figure 1.4.3 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil de l'est de Paris ; a) E-MBA-1, b) E-MBA-0



(a)



(I=illite, K=kaolinite, S=smectite)

(b)

Figure 1.4.4 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil : E-MBA-01 (a) et des Argiles vertes de Romainville (colluvions) : E-AVR-C (b)

Tableau 1.4.2 : Teneur en carbonates des sols étudiés, déterminée par la méthode Dietrich – Frühling

Echantillon	Teneur en carbonates (%)
E-AVR-C	7,0 à 10,6
E-AVR-1	18,4 à 21,7
E-AVR-0	9,8 à 17,9
E-MBA-1	20,2 à 62,0
E-MBA-01	26,4 à 54,5
E-MBA-0	62,6 à 64,4

L'analyse des diffractogrammes et les résultats des 2 tableaux permettent de formuler les remarques suivantes :

- Les minéraux non argileux dans les Argiles vertes de Romainville de l'est (Villeparisis-Le Pin) sont représentés par du quartz, de la dolomite et des traces de feldspaths ; dans les Marnes bleues d'Argenteuil on trouve du quartz, de la calcite et des traces d'oxydes de fer (pyrite) ;
- Le quartz est présent dans tous les échantillons en quantité significative, ce sont les Marnes bleues inférieures qui en contiennent le moins ;
- La teneur en carbonates dans la partie inférieure des Marnes bleues est beaucoup plus importante que dans la partie supérieure ;
- Les Argiles vertes contiennent de 9 à 22 % de carbonates et peuvent être qualifiées d'argiles calcareuses. Les Marnes bleues contiennent de 20 à 64 % de carbonates justifiant ainsi l'appellation de marne ;
- Les Argiles vertes supérieures, inférieures et colluvions présentent des diffractogrammes quasi-identiques. Les minéraux argileux les plus représentés sont l'illite et les smectites ou les interstratifiés illite-smectite. On note également la présence, mais en plus faible quantité, de kaolinite ;
- Les minéraux argileux, contenus dans les Marnes bleues supérieures, sont composés essentiellement d'illite et de smectite ou d'interstratifiés illite-smectite avec des traces ou une présence faible de kaolinite. Les Marnes bleues inférieures contiennent essentiellement des argiles fibreuses (attapulgitite principalement), une faible quantité de smectites et d'illite, la kaolinite étant très peu ou pas représentée.

Par ailleurs, une étude minéralogique complémentaire a été réalisée par analyse thermique différentielle et thermogravimétrique (ATD-ATG) et spectroscopie infrarouge (IR) sur les Argiles vertes de Romainville inférieures et sur les Marnes bleues d'Argenteuil supérieures de l'Est (Laribi et al., 2007).

L'analyse *thermo-gravimétrique* (ATG) est basée sur la mesure de la perte de masse d'un matériau en fonction de la température, permettant ainsi l'étude des transformations internes, comme les transferts de masses associés à des réactions chimiques de déshydratation et déshydroxylation et une libération ou une absorption d'énergie. La mesure se fait avec une balance de très haute précision.

L'analyse *thermique différentielle* (ATD) consiste à suivre l'évolution de la différence de température (due aux transformations allotropiques, aux changements d'état ou aux réactions de déshydroxylation et de déshydratation) entre l'échantillon étudié et un échantillon de référence thermiquement inactif dans le domaine de température exploré. Les mesures ont été effectuées sur un appareil ATD-ATG, mesures couplées, de marque TGA 92 de SETARAM. Le matériau à étudier est placé dans une coupelle en platine, les quantités utilisées varient de 0,5 à 30 mg. Le taux de chauffe est de $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Le gaz vecteur est l'argon.

La *spectroscopie infrarouge* est une technique locale qui permet d'identifier les espèces minérales en présence (Oinuma et Hayashi, 1968). Cette technique permet de confirmer et de compléter les données de la diffraction des rayons X en apportant des renseignements sur les vibrations des atomes dans une structure moléculaire. Elle est très sensible à la présence des hydroxyles dans la structure, ce qui permet d'utiliser les OH comme sonde infrarouge pour déterminer par exemple le caractère di ou trioctaédrique des argiles. Les échantillons ont été préparés sous forme de pastilles contenant 1% en masse d'argile dans environ 300 mg de bromure de potassium (KBr), et les spectres ont été enregistrés entre 600 et 4000 cm^{-1} à l'aide d'un spectromètre FTIR PERKIN ELMER 1000.

Les résultats de l'étude réalisée en spectroscopie infrarouge, présentés sur la Figure 1.4.5, confirment les conclusions précédentes ; et ceci par la présence de :

- une bande de vibration de valence des OH liés à l'aluminium vers 3620 cm^{-1} suggérant ainsi la présence d'une argile 2/1. Il s'agit de la smectite et de l'illite pour ces deux matériaux AVR et MBA.
- des bandes de vibration de valence de Si-O et OH du réseau argileux vers 1000 cm^{-1} et 3680 cm^{-1} confirmant la présence d'une kaolinite dans ces matériaux (Caillère et al. 1982, Dixon et Weed, 1977).

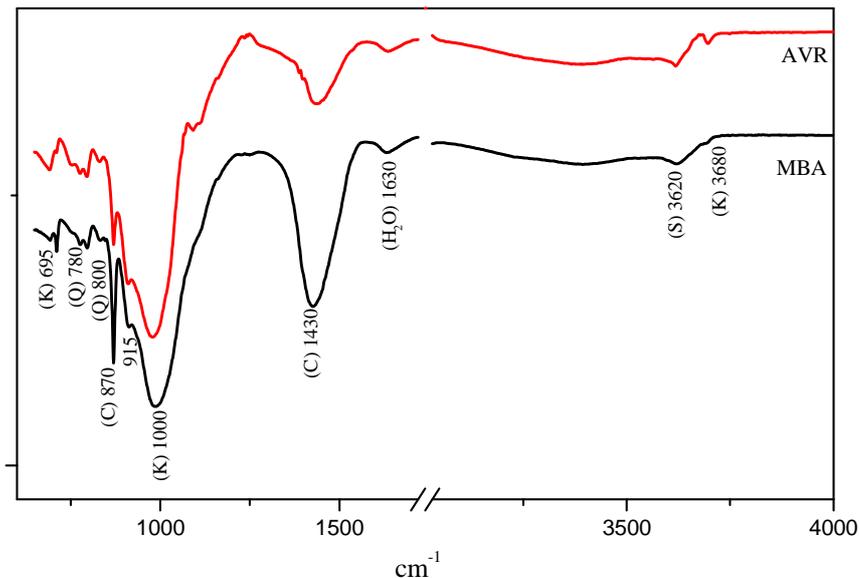


Figure 1.4.5 : Spectres infra-rouge (IR) des argiles AVR et de MBA

La bande vers 1630 cm^{-1} est attribuable à la bande de vibration de déformation du groupement OH de l'eau d'hydratation de l'argile. La bande à 915 cm^{-1} correspond à la bande de vibration de déformation de Al-OH confirmant ainsi le caractère dioctaédrique de l'argile.

Les bandes de vibration à 800 cm^{-1} et 780 cm^{-1} montrent la présence de quartz dans les deux sols. La présence des carbonates est confirmée par les bandes de vibration de valence et de déformation vers 1430 cm^{-1} et 870 cm^{-1} . L'importante intensité de la bande vers 1430 cm^{-1} sur le spectre de MBA reflète la grande quantité de calcite dans ce matériau, ce qui est en accord avec les précédents résultats.

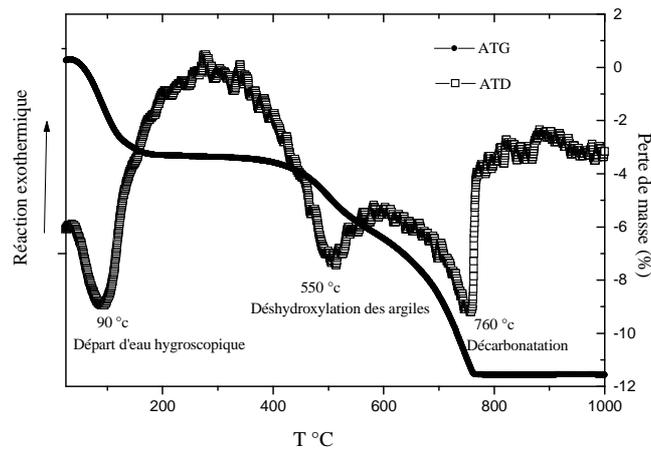
Les thermogrammes des argiles AVR, MBA présentés sur la Figure 1.4.6 montrent :

- des pics endothermiques à 90°C pour les deux échantillons, accompagnés d'une perte de masse correspondant au départ d'eau hygroscopique (déshydratation) (Dixon et Weed, 1977).
- des pics endothermiques entre 500°C et 550°C pour les deux argiles, accompagnés d'une perte massique typique de la déshydroxylation des feuillets de kaolinite et /ou d'une smectite de type beidellite (Greene, 1957)
- un pic endothermique à 760°C et 820°C respectivement pour AVR et MBA correspondant à une décarbonatation, et reflétant la grande quantité de carbonates au

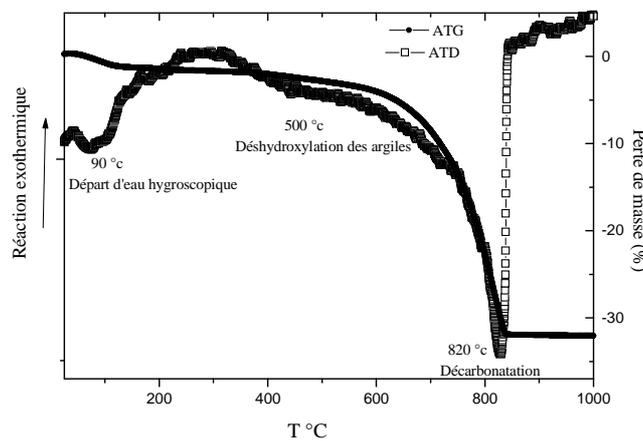
niveau de l'échantillon MBA, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par spectroscopie infrarouge.

- un pic exothermique aux alentours de 900°C, typique d'une destruction et d'une recristallisation du réseau silicaté et relatif à une smectite de type beidellite. (Weir et Greene, 1962).

En conclusion, la caractérisation minéralogique par les différentes méthodes montre que les deux matériaux - Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil - de l'Est de Paris sont constitués de minéraux argileux : illite, smectite et kaolinite, ainsi que de minéraux non argileux : quartz et carbonates principalement. On note une forte teneur en carbonates dans les Marnes bleues d'Argenteuil.



(a)



(b)

Figure 1.4.6 : Thermogrammes des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil : a) AVR ; b) MBA

1.4.1.2 Echantillons de l'Ouest de Paris (Cormeilles-en-Parisis)

Les diffractogrammes obtenus, sur les lames de poudre et sur les lames d'argile sont présentés sur la Figure 1.4.7, la Figure 1.4.8 et la Figure 1.4.9.

Le Tableau 1.4.3 résume l'importance relative des minéraux principaux présents dans les échantillons de l'Ouest ; leur teneur en carbonates est donnée dans le Tableau 1.4.4.

Tableau 1.4.3 : Analyse minéralogique des sols étudiés (Cormeilles-en-Parisis)

	W-AVR-1	W-AVR-0	W-MBA-1	W-MBA-0
Quartz	++	++	++	+
Calcite	++	++	++	+++
Feldspaths	traces	+	-	-
Minéraux argileux	+++	+++	++	++
Oxydes de fer	-	-	traces	traces
Minéraux argileux dans la fraction argileuse				
Illite	+++	+++	+++	+++
Kaolinite	++	++	+	+
Smectite et Interstratifiés Illite-Smectite	+	+	++	++
Argiles fibreuses	-	-	+	traces
Chlorite	++	+	+	+

(+++ : très abondant, ++ : abondant, + : peu abondant, - : non décelé)

Tableau 1.4.4 : Teneur en carbonates des sols étudiés, déterminée par la méthode Dietrich – Frühling

Echantillon	Teneur en carbonates (%)
W-AVR-1	13,7 à 16,0
W-AVR-0	13,8 à 16,3
W-MBA-1	19,4 à 25,1
W-MBA-0	56,9 à 61,4

L'analyse des diffractogrammes et les résultats des 2 tableaux permettent de formuler les remarques suivantes :

- Les minéraux non argileux présents dans les Argiles vertes de Romainville de l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) sont représentés par du quartz, de la calcite et des traces de feldspaths, alors que dans les Marnes bleues d'Argenteuil on trouve du quartz, de la calcite et des traces d'oxyde de fer (pyrite) et du gypse.
- Le quartz est présent dans tous les échantillons en quantité significative, ce sont les Marnes bleues inférieures qui en contiennent le moins
- Les Argiles vertes contiennent de 14 à 17 % de carbonates et peuvent être qualifiées d'argiles faiblement calcareuses. Par contre, la teneur en carbonates des deux séries d'échantillons de Marnes bleues (supérieure et inférieure) est très différente. La proportion de calcite diminue du bas vers le haut, ainsi la partie supérieure est faiblement carbonatée ;

- Les Argiles vertes supérieures et inférieures présentent des diffractogrammes de minéraux argileux identiques. Les plus représentés sont l'illite, la kaolinite, la chlorite et en plus faible quantité, les smectites ou interstratifiés illite/smectite ;
- Les minéraux argileux, contenus dans les Marnes bleues supérieures et inférieures, sont composés essentiellement d'illite et de smectite ou d'interstratifiés illite-smectite avec une présence faible de kaolinite dans la partie supérieure, de chlorite et d'argiles fibreuses ;

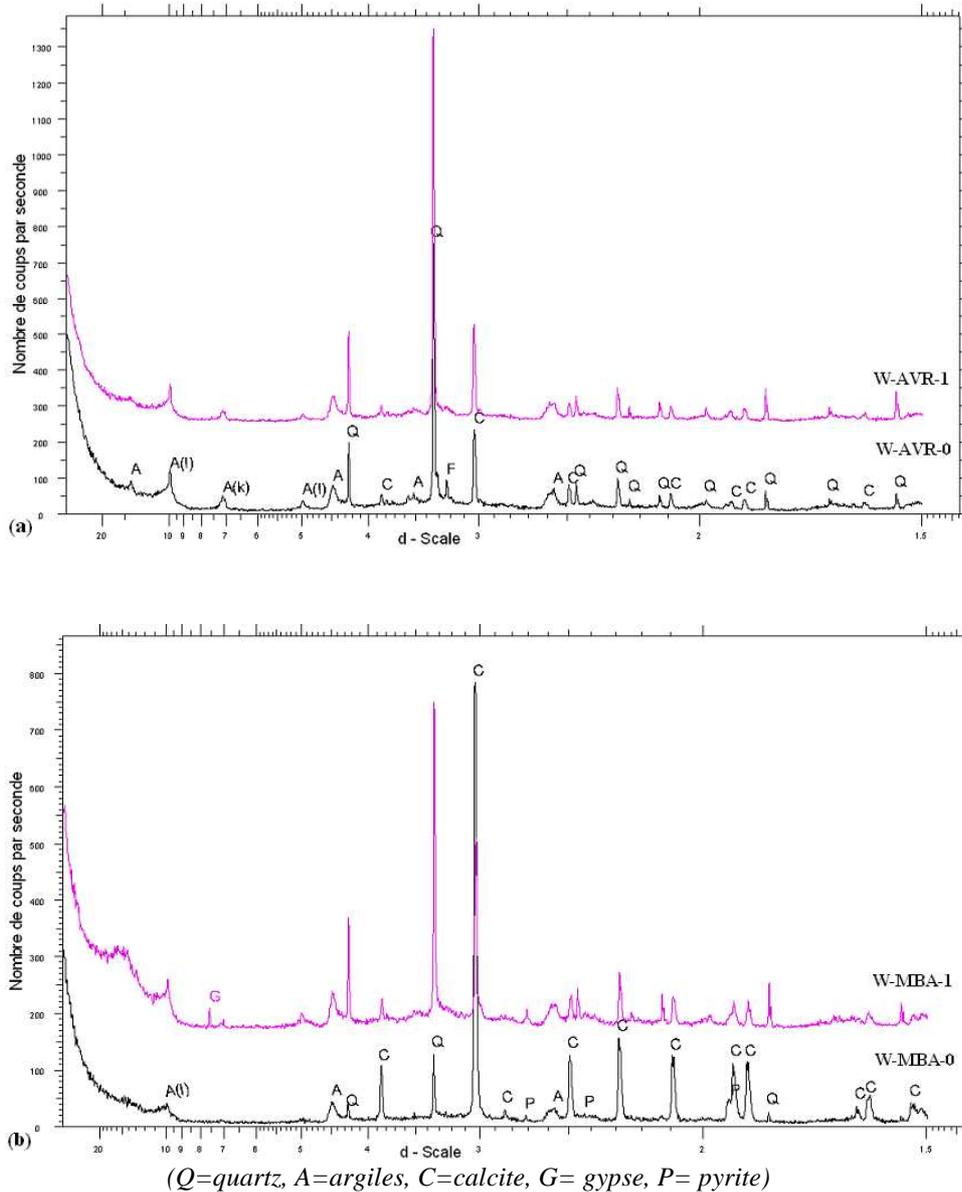
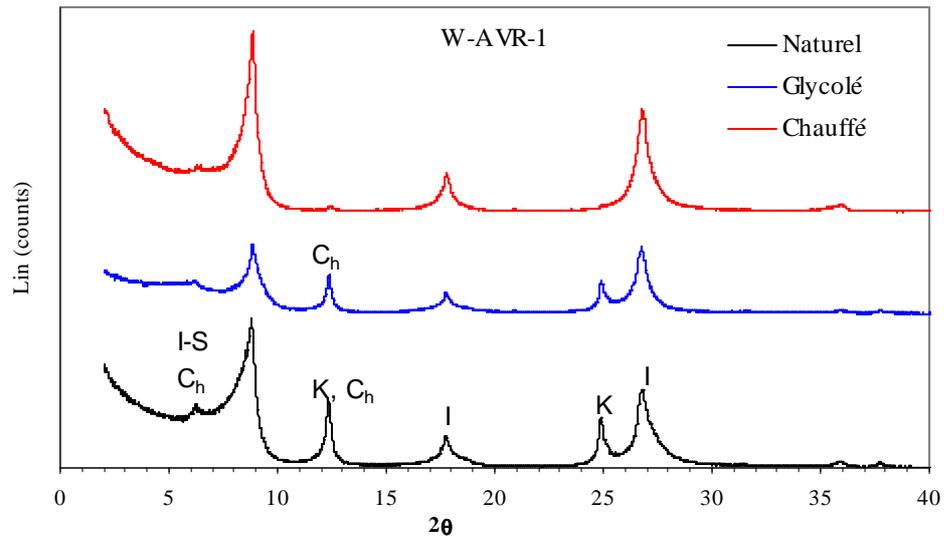
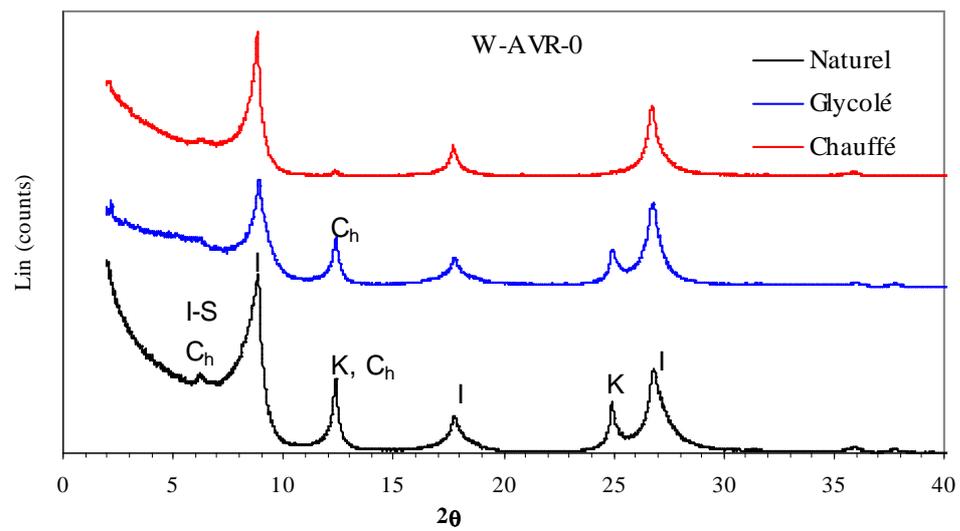


Figure 1.4.7 : Diffractogrammes RX des lames de poudres des échantillons de l'ouest de Paris : a) Argiles vertes de Romainville inférieures et supérieures ; b) Marnes bleues d'Argenteuil inférieures et supérieures



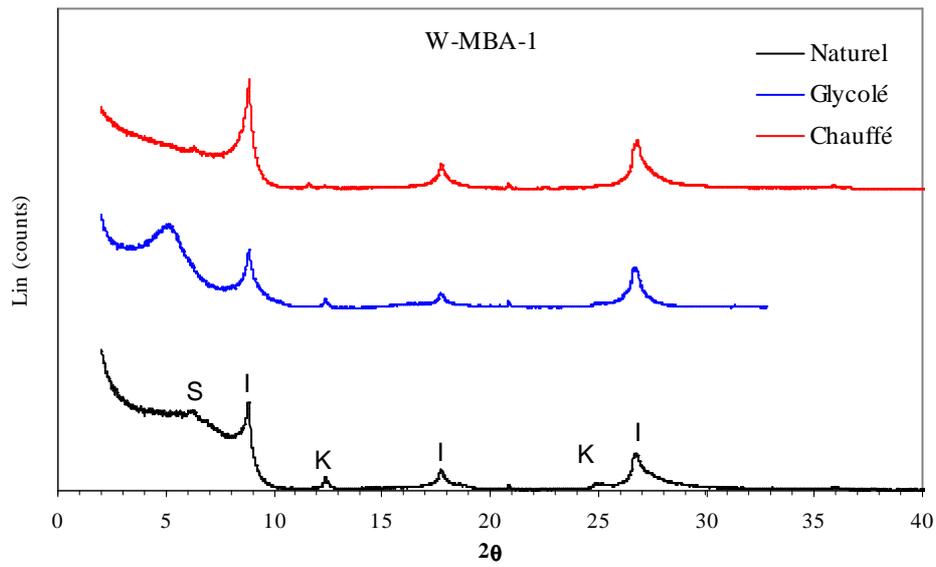
(a)



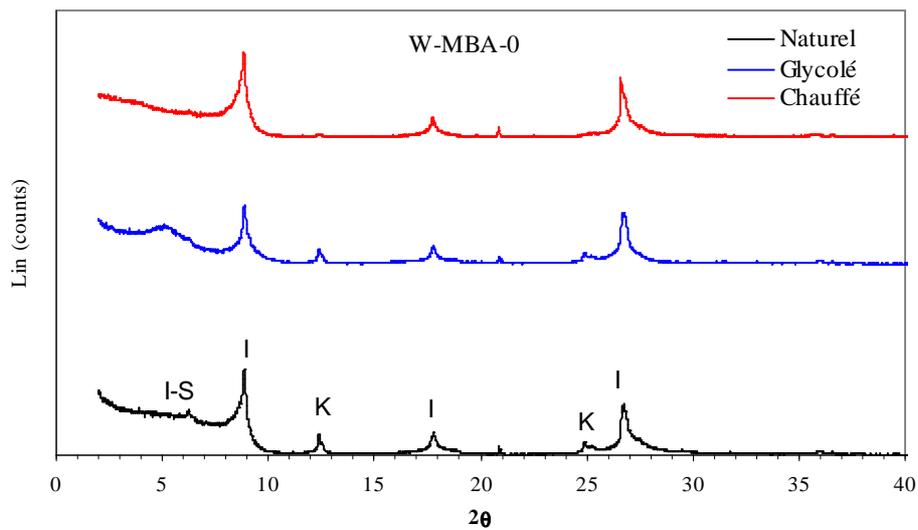
(b)

(I=illite, k=kaolinite, S= semictite, C_h=chlorite)

Figure 1.4.8 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons d'Argiles vertes de Romainville de l'ouest de Paris ; a) W-AVR-1, b) W-AVR-0



(a)



(I=illite, k=kaolinite, S= semictite)

(b)

Figure 1.4.9 : Diffractogrammes RX des lames d'argiles des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil ; a) W-MBA-1, b) W-MBA-0

Les résultats des caractérisations minéralogiques des échantillons des deux sites montrent que :

- Les sols prélevés dans les deux carrières ont une composition minéralogique comparable, à l'exception des 2 types de carbonates présents dans les Argiles vertes ; les carbonates sont représentés par de la dolomite dans les Argiles vertes prélevées à l'est et par de la calcite dans celles prélevées à l'ouest ;
- Dans les Argiles vertes de l'est, la proportion de smectite est plus importante que dans les Argiles vertes de l'ouest.
- Les minéraux argileux, contenus dans les Marnes bleues supérieures et inférieures, sont composés essentiellement d'illite, de smectite ou d'interstratifiés illite-smectite avec des traces ou une présence faible de kaolinite ;
- La chlorite est nettement représentée dans les Argiles vertes et les Marnes bleues de l'Ouest et les argiles fibreuses sont les minéraux argileux majoritaires dans les Marnes bleues inférieures de l'Est.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de la littérature (Parcevaux, 1980 ; Donsimoni et al. 2004, 2006).

1.4.1.3 Caractérisation minéralogique des profils des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'Est (Villeparisis-le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) de Paris

Les diagrammes de la Figure 1.4.10 présentent les distributions des principaux minéraux non argileux, le long du profil de la formation des Argiles vertes de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis).

Une analyse semi-quantitative basée sur la hauteur de pics et la cristallinité a été effectuée. Les principaux minéraux non argileux sont représentés par le quartz et les carbonates. Le quartz représente 30 à 50 % des minéraux dans le profil, entre 0 à 3,40 m de hauteur, à l'exception de 3 échantillons situés à la même cote dans les deux profils à 1,20 m, 2,20 m et 3,50 m. Au dessus de 3,50 m le pourcentage en quartz diminue. Le pourcentage en carbonates est inférieur à 25 % jusqu'à 3,40 m à l'exception des 3 niveaux mentionnés précédemment riches en carbonates, principalement, sous forme de nodules à l'Est et de lits à l'Ouest. Au dessus de 3,40 m la répartition des carbonates varie de quelques % à 45 %. Ces carbonates sont représentés exclusivement par de la calcite jusqu'à 2,30 m de hauteur, puis par de la dolomite jusqu'au sommet de la formation, avec parfois une petite part de calcite, pour certains échantillons, à l'Ouest.

A ces minéraux non argileux principaux, s'ajoutent un pourcentage de feldspaths compris entre 1 et 5 %, les pourcentages les plus importants se situant à la base de la formation.

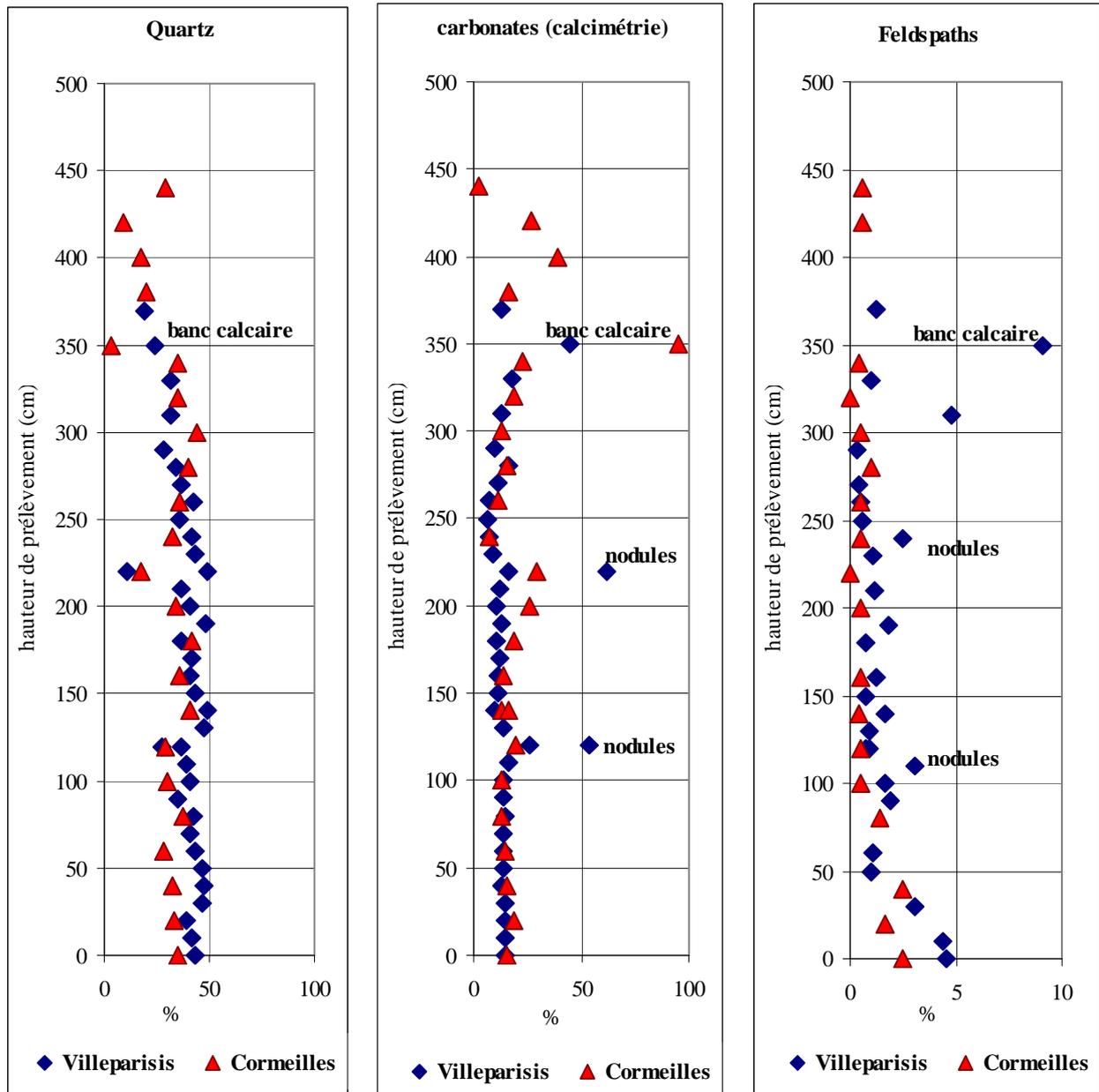
Les distributions des principaux minéraux argileux, le long du profil de la formation des Argiles vertes de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) sont présentées dans la Figure 1.4.11.

Les argiles représentent 35 à 50 % de la totalité des minéraux jusqu'à 3,60 m et augmentent progressivement dans la partie supérieure de la formation (jusqu'à 70 % à Cormeilles-en-Parisis). L'argile la plus représentée est l'illite (15 à 35 % de la totalité de minéraux). Son pourcentage varie de façon séquentielle (ce phénomène est surtout visible à l'Est où les prélèvements sont plus rapprochés) : au cours d'une séquence le pourcentage augmente progressivement puis une chute brutale est observée avant la séquence suivante. Ce

phénomène séquentiel s'observe aussi pour le quartz avec une variation inverse : la part d'illite augmente quand celle du quartz diminue.

La kaolinite est très peu représentée (moins de 10 %). Son pourcentage diminue progressivement à partir de 2,80 m pour atteindre moins de 1 % à Villeparisis-Le Pin.

Les argiles gonflantes sont représentées essentiellement par des smectites à l'Est et par des smectites et des interstratifiés illite/smectite à l'Ouest. Quelques traces de chlorite apparaissent aussi dans les argiles de l'Ouest. Ces argiles gonflantes représentent moins de 25 % de l'ensemble des minéraux argileux. Le pourcentage diminue progressivement dans le premier mètre, se stabilise dans la partie centrale de la formation (1,00 et 2,00 m) et augmente à nouveau de façon progressive pour atteindre un peu plus de 25 % des argiles au sommet de la formation (Figure 1.4.11).



(a)

(b)

(c)

Figure 1.4.10 : Distribution du quartz (a) des carbonates dosés par calcimétrie (b) et des feldspaths (c) le long des profils de l'Argile verte de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis)

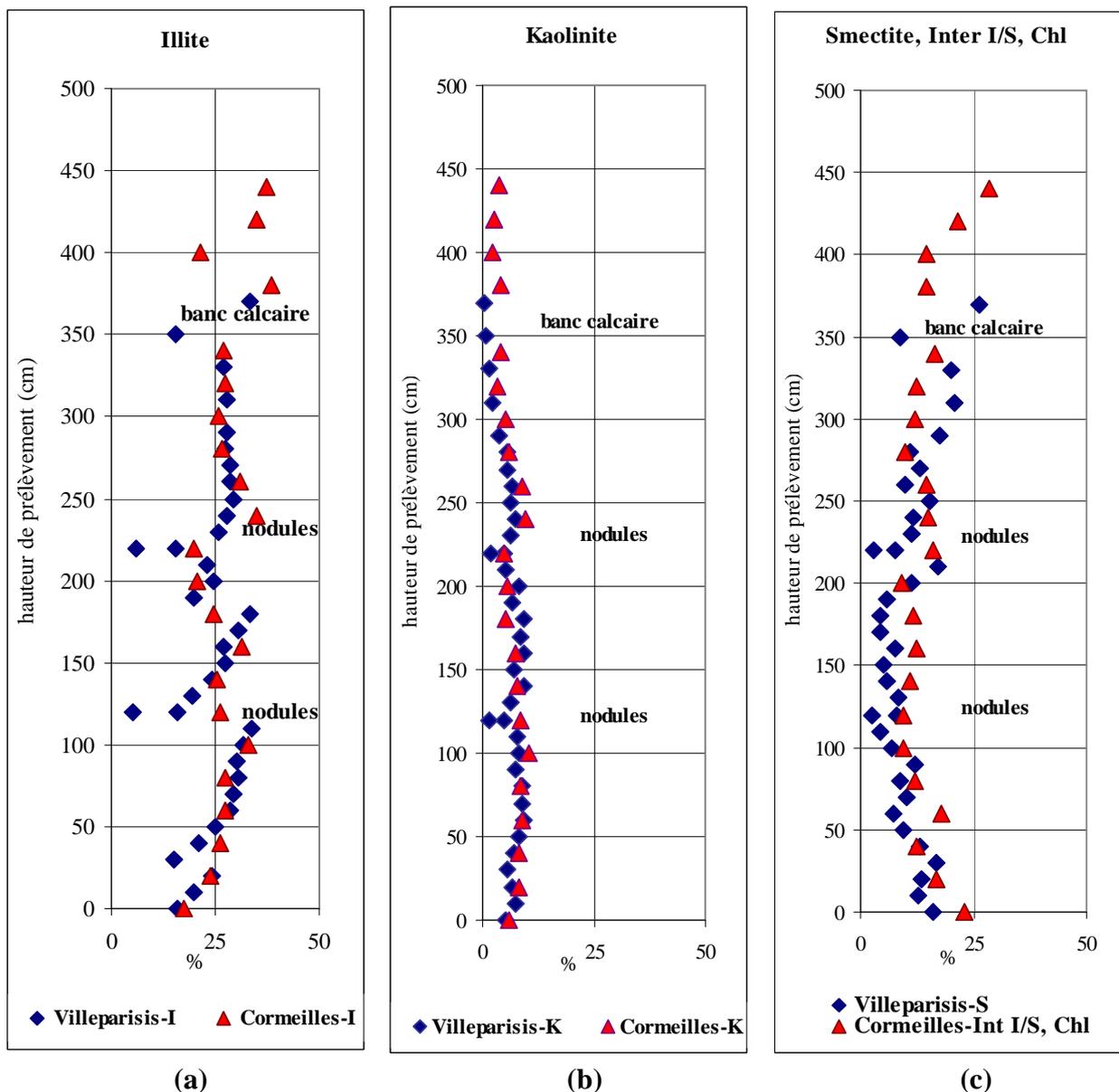


Figure 1.4.11 : Distribution des minéraux argileux le long des profils de l'Argile verte de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis), kaolinite (a), illite (b), smectites et interstratifiés (c)

La synthèse des résultats des analyses minéralogiques concernant les deux profils met en évidence :

- Une continuité de faciès entre l'Est et l'Ouest du bassin de Paris : les diagrammes présentent des variations et une répartition identique des minéraux le long du profil des deux sites ;
- Une distribution séquentielle du quartz (jusque vers 2,50 à 3,00 m) suivie d'une diminution progressive vers le sommet de la formation ;
- Un enrichissement en carbonates vers le sommet de la formation, composés pour la moitié inférieure de calcite seule et pour la moitié supérieure de dolomite majoritairement ;
- Une diminution du pourcentage en quartz et en feldspaths au profit des carbonates du bas vers le haut de la formation ;

- Un enrichissement en argiles de types illite et smectite ou interstratifié illite/smectite et un appauvrissement en kaolinite vers le sommet de la formation.

La distribution minéralogique des profils des Argiles vertes de Romainville des deux sites met en évidence une continuité de faciès et la présence de niveaux repères carbonatés. Les minéraux détritiques (quartz, feldspaths, kaolinite) témoignant d'un apport sédimentaire d'origine continentale diminuent de la base vers le sommet de la formation au profit d'une sédimentation à caractère marin plus prononcé (carbonates, smectites), accompagnée d'un enrichissement en magnésium (dolomite).

1.4.2 Caractérisation géotechnique

1.4.2.1 Essais d'identification

Des essais de caractérisation géotechnique ont été effectués suivant les normes AFNOR sur des échantillons prélevés à différents niveaux dans les deux carrières, afin d'identifier leur potentiel gonflant et rétractant. La liste des essais réalisés est présentée dans le Tableau 1.4.5.

Tableau 1.4.5 : Essais de caractérisation géotechnique réalisés sur les échantillons étudiés

Essai	Nombre d'essais
Teneur en eau naturelle w_{nat}	Nombreuses mesures
Courbes granulométriques	2
Limites d'Atterberg	
Limite de liquidité (w_L)	3
Limite de plasticité (w_p)	3
Limite de retrait sur sol remanié (w_R)	3
Limite de retrait sur échantillon intact (w_{Re})	3
Poids volumique humide	Nombreuses mesures
Masse volumique des particules solides	2
Valeur de bleu (VB)	2
Surface spécifique externe (BET)	2
Teneur en matières organiques	3

Des paramètres géotechniques simples sont déduits des valeurs de ces essais :

- Indices géotechniques :
 - Indice de plasticité ($I_p = w_L - w_p$)
 - Indice de retrait ($I_R = w_L - w_R$)
 - Indice de consistance ($I_C = (w_L - w) / I_p$)
- Indice de Skempton ou activité de Skempton ($A_c = I_p / < 2\mu m$)
- Coefficient d'argilosité (Magnan et Youssefian, 1989) ($A = VB / < 2\mu m$)
- Indice des vides
- Porosité (n)
- Capacité d'échange cationique (CEC)
- Surface spécifique totale

L'ensemble des résultats obtenus est regroupé dans le Tableau 1.4.6 pour les échantillons de l'Est, et dans le Tableau 1.4.7 pour les échantillons de l'Ouest. Le diagramme de Casagrande est représenté sur la Figure 1.4.12 et les courbes granulométriques sur la Figure 1.4.13.

Les limites d'Atterberg ont été déterminées selon la norme AFNOR NF P 94-050, à l'aide de l'appareil de Casagrande pour la limite de liquidité. La teneur en eau massique est mesurée par séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

La limite de retrait conventionnelle a été déterminée selon la norme AFNOR XP P94-060-1 à partir d'une pâte constituée des éléments passant au tamis de 400µm et séchée à l'air libre.

La limite de retrait effective a été mesurée selon la norme française AFNOR XP P94-060-2 sur le sol intact. Cet essai consiste à mesurer la variation de hauteur d'une éprouvette cylindrique extraite d'un échantillon intact, disposée sur un bâti et soumise à dessiccation à l'air libre, puis à l'étuve. L'évolution de la variation de hauteur avec la teneur en eau représente la courbe de retrait à partir de laquelle la limite de retrait effective est déterminée. Les limites de retrait effectives, obtenues par une étude complémentaire effectuée en mesurant l'évolution de la variation de volume du sol avec la teneur en eau, sont données dans le Tableau 1.4.6 et le Tableau 1.4.7

Les masses volumiques humide γ_h et sèche γ_d sont obtenues par mesure du volume initial au volumètre à mercure. La porosité totale est calculée en considérant que les échantillons sont initialement saturés.

Tableau 1.4.6 : Caractéristiques géotechniques des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est (Villeparisis-Le Pin)

	<i>E-AVR-0</i>	<i>E-AVR-1</i>	<i>E-AVR-C</i>	<i>E-MBA-0</i>	<i>E-MBA-01</i>	<i>E-MBA-1</i>
Teneur en eau naturelle moyenne w_{nat} (%)	30	25	32	37	29	30
Limite de liquidité, w_L (%)	75,2	72,0	76,3	86	96,6	89,5
Limite de plasticité w_p (%)	39,6	37,6	38,9	43,5	40,2	42,1
Limite de retrait sur échantillon remanié w_R (%)	15,5	16,1	17,1	28,8	18,9	21,3
Limite de retrait sur échantillon intact w_{Re} (%) $\Delta H/H_o$	16	15	17	33	22	29
Limite de retrait sur échantillon intact w_{Re} (%) $\Delta V/V_o$	17	16	17	29	23	22
Indice de plasticité, I_p (%)	35,6	34,4	37,4	42,5	57	47,4
Indice de retrait, I_R (%)	59	56	59	57	78	68
Indice de consistance, I_C	1,3	1,4	1,2	1,2	1,2	1,4
Fraction fine < 2µm (%)	78	80	80	89	81	78
Indice de Skempton A_c	0,45	0,43	0,45	0,47	0,70	0,60
Poids volumique du solide γ_s (kN.m ⁻³)	27,9	27,9	28,0	27,1	28,0	27,5
Poids volumique humide moyen γ_h (kN.m ⁻³)	19,4	20	20,2	18,5	19,9	18,9
Poids volumique sec moyen γ_d (kN.m ⁻³) calculé	15,1	15,8	16,0	13,5	15,5	14,2
Porosité totale calculée n (%)	46	43	45	50	44	48
Valeur de bleu V_{BS} (g/100g)	9,3	8,7	9,3	5,4	10,4	9,7
Coefficient d'argilosité A	0,12	0,11	0,12	0,06	0,13	0,12
Capacité d'échange Cationique CEC (meq/100g)	24,9	23,2	24,9	14,3	27,8	25,9
Surface spécifique calculée S_s (m ² /g)	195	181	195	111	218	202
Surface spécifique externe BET (m ² /g)	67,9	63,7	77,6	34,1	49,6	41,9
Teneur en matières organiques MO (%)	0,12	0,23	0,10	0,46	2,84	3,07

Tableau 1.4.7 : Caractéristiques géotechniques des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil et de l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis)

	W-AVR-0	W-AVR-1	W-MBA-0	W-MBA-1
Teneur en eau naturelle moyenne w_{nat} (%)	34	30	27	37
Limite de liquidité w_L (%)	68,2	62,8	63,9	84,4
Limite de plasticité w_p (%)	32,7	31,4	28,1	43,4
Limite de retrait sur échantillon remanié w_R (%)	19,3	18,1	19,9	19,5
Limite de retrait sur échantillon intact w_{Re} (%) $\Delta H/H_o$	22	23	22	
Limite de retrait sur échantillon intact w_{Re} (%) $\Delta V/V_o$	21			
Indice de plasticité I_p (%)	35,5	31,4	35,8	41
Indice de retrait I_R (%)	48,9	44,7	44	64,9
Indice de consistance I_C	0,97	1,04	1,03	1,16
Fraction fine < 2 μ m (%)	90	84	91,5	77,5
Indice de Skempton A_c	0,39	0,38	0,39	0,53
Poids volumique du solide γ_s (kN.m ⁻³)	27,6	27,7	27,5	27,9
Poids volumique humide moyen γ_h (kN.m ⁻³)	19,4	19,4	19,7	
Poids volumique sec moyen γ_d (kN.m ⁻³) calculé	14,8	14,8	15,4	
Porosité totale calculée moyenne n (%)	46,5	47	43	
Valeur de bleu V_{BS} (g/100g)	7,3	6,7	5,3	10,5
Coefficient d'argilosité A	0,08	0,08	0,06	0,14
Capacité d'échange Cationique CEC (meq/100g)	19,5	17,9	14,2	28,1
Surface spécifique calculée S_s (m ² /g)	153	140	111	220
Surface spécifique externe BET (m ² /g)	56,5	50,1	37,7	50,7
Teneur en matières organiques (%)	0,59	0,5	1,1	2,72

La teneur en matières organiques est déterminée par attaque chimique, par la méthode Anne selon la norme AFNOR NF P 94-055. Le principe de cette méthode est l'oxydation à chaud de la matière organique par une solution de bichromate de potassium additionnée de l'acide sulfurique, puis dosage du bichromate restant par une solution de sel de Mohr. Le calcul s'effectue en admettant que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone organique du sol. Trois prises d'essais sont effectuées pour chaque échantillon, les valeurs moyennes sont reportées dans le Tableau 1.4.6 et Tableau 1.4.7.

L'essai au bleu de méthylène (V_{BS}) est effectué selon la norme AFNOR NF P 94-068. Cet essai consiste à mesurer, pour 100 g de matériau, la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir la surface externe et interne des particules présentant un déficit de charge. C'est un essai simple et rapide qui permet d'évaluer indirectement la capacité d'échange cationique et la surface spécifique développée par les minéraux argileux (S_s).

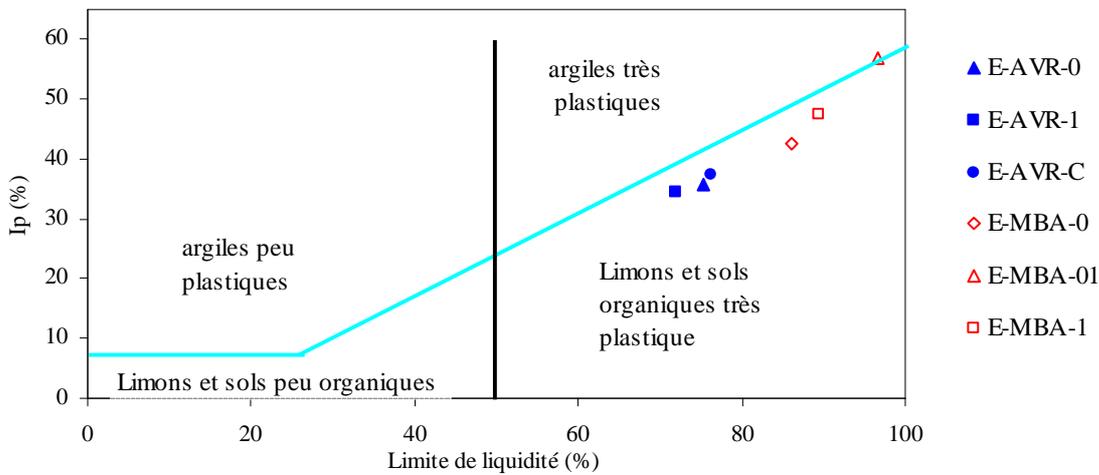
Connaissant la masse molaire du bleu de méthylène, et en admettant que le bleu est entièrement adsorbé sous forme monovalente (Clément, 1988), la capacité d'échange cationique de l'argile est déterminée par la relation suivante :

$$CEC \text{ (meq/100g)} = \frac{V_{BS} \text{ (g/100g)}}{374} \times 1000$$

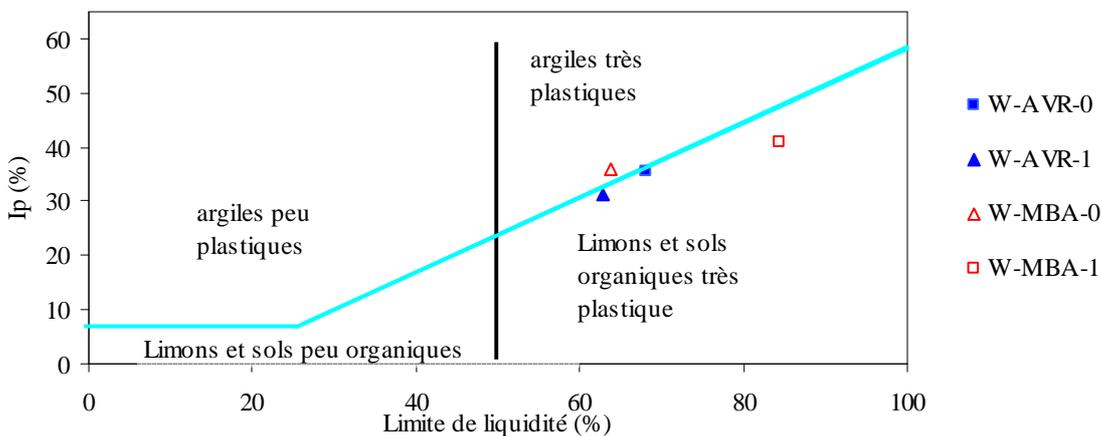
Pour déterminer la surface spécifique totale, on considère que les molécules de bleu sont disposées d'une façon telle que la surface couverte est de 130 \AA^2 par molécule (les molécules de bleu de méthylène sont disposées parallèlement aux couches d'argile et forment une couche monomoléculaire). La surface spécifique totale est donnée par la relation suivante :

$$S_s(m^2/g) = V_{BS} \times \frac{6,023 \cdot 10^{23} \times 130 \cdot 10^{-20}}{374 \times 100} = 20,93 \times V_{BS} (g/100g)$$

Les surfaces spécifiques externes ont été mesurées sur des échantillons de poudres (de l'ordre de 0,3 gramme) par la méthode BET (désorption d'azote).



(a)

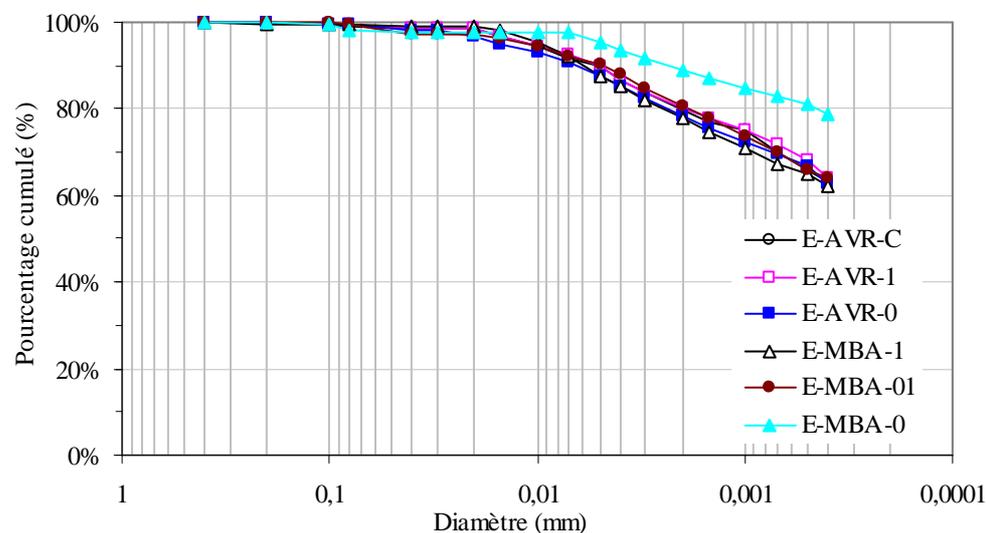


(b)

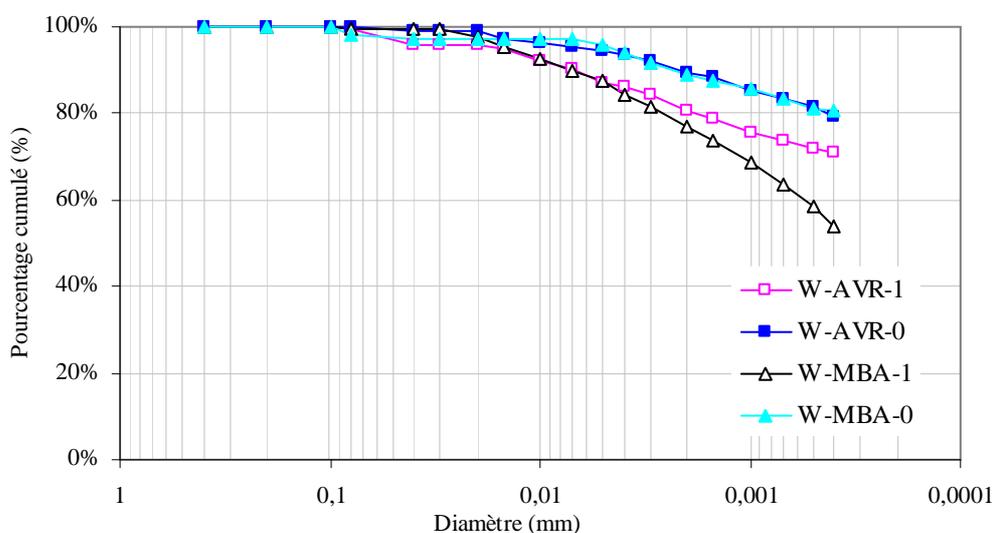
Figure 1.4.12 : Limite de liquidité et indice de plasticité des sols étudiés reportés sur le diagramme de plasticité de Casagrande (a) pour l'Est et (b) pour l'Ouest

Les analyses granulométriques, pour les éléments de dimension supérieure ou égale à $40 \mu\text{m}$, ont été effectuées par tamisage en pesant le refus obtenu sur chaque tamis. Pour les particules inférieures à $40 \mu\text{m}$, les analyses granulométriques ont été effectuées à l'aide d'un Sédigraph. L'appareil mesure la proportion de particules sédimentées, pour une dimension donnée

calculée suivant la loi de Stokes. Cette loi exprime la relation entre la vitesse de décantation d'une particule solide sphérique dans un liquide et le diamètre de cette particule. Le Sédigraph détermine au moyen d'un faisceau fin de rayon X la concentration de particules à des hauteurs décroissantes en fonction du temps. Les courbes granulométriques obtenues sont représentées sur la Figure 1.4.13 et la fraction inférieure à $2\ \mu\text{m}$ pour chaque matériau est donnée dans le Tableau 1.4.6 et le Tableau 1.4.7.



(a)



(b)

Figure 1.4.13 : Courbes granulométriques des échantillons étudiés a) Villeparisis-Le Pin, b) Corneilles-en-Parisis

Les résultats contenus dans ces tableaux et les figures jointes permettent d'énoncer les caractéristiques suivantes :

- Tous les sols sont plastiques, voire très plastiques, et ont une granulométrie à dominante argileuse ($78\% < 2\ \mu\text{m}$). Dans le diagramme de plasticité de Casagrande, tous les sols étudiés se placent sur ou juste au-dessous de la ligne A (Figure 1.4.12), et sont classés dans le domaine des sols très plastiques pour les sols de l'Ouest et dans le

domaine des limons et sols organiques très plastiques pour les sols de l'Est. Les valeurs fortes de l'essai au bleu de méthylène (V_{BS}) confirment la plasticité élevée des échantillons ;

- La teneur en matière organique des Marnes bleues (comprise entre 1 et 3 %) est supérieure à celle des Argiles vertes (< 1 %) ;
- La teneur en eau naturelle est élevée et variable (comprise entre 25 et 40 %). Cette variabilité est due en partie à l'hétérogénéité des formations mais aussi aux conditions climatiques au moment des différents prélèvements ;
- Les valeurs de l'indice de consistance généralement supérieures à 1 pour les deux formations étudiées dénotent une sensibilité au gonflement potentiellement importante ;
- Les poids volumiques secs et humides sont faibles et varient peu ;
- La porosité des 2 formations est élevée (comprise entre 39 et 50 %) ;
- Les deux séries d'échantillons de Marnes bleues prélevées dans les deux carrières se différencient par leur teneur en carbonates et leur teneur en matières organiques (la partie supérieure est « faiblement organique » (XP P 94-011)) ;
- Les valeurs de bleu, les surfaces spécifiques totales et les CEC qui en découlent correspondent à des sols composés d'un mélange de plusieurs minéraux argileux notamment d'illite et de smectite, ce qui est en accord avec l'analyse minéralogique par diffraction RX. La quantité de bleu adsorbée par un mélange est égale à la somme des quantités respectivement adsorbées par chaque groupe de minéraux argileux qui entre dans sa composition (Tourenq et Tran Ngoc Lan, 1989) ;
- Les valeurs de CEC calculées sont supérieures à celles déterminées par la méthode au cobaltihexamine rapportées par Laribi et al (2008) : 16,2 pour les Argiles vertes (E-AVR-0) et 9 pour les Marnes bleues inférieures (E-MBA-0) de l'Est. La différence peut être liée à la précision des méthodes de mesure ;
- Les surfaces spécifiques externes mesurées par le BET représentent entre un tiers et un quart de la surface spécifique totale calculée, à partir de la valeur de bleu pour chaque échantillon, démontrant ainsi la part importante de surface interne développée par les argiles gonflantes ;
- Les valeurs de bleu, les surfaces spécifiques totales, les CEC calculées, et les surfaces spécifiques externes mesurées au BET des Argiles vertes de l'Ouest sont inférieures à celles des Argiles vertes de l'Est. Ceci est expliqué par le pourcentage plus important des argiles à composante smectitique au sein des Argiles vertes de l'Est ;
- Les Marnes bleues supérieures des 2 sites présentent des valeurs de bleu, des surfaces spécifiques totales et des CEC plus importantes que celles des autres matériaux. Ceci est dû à une proportion plus grande d'argiles gonflantes et de matières organiques. Ces résultats sont en accord avec ceux de Bigorre et al. (2000), obtenus sur 50 horizons différents, qui montrent que les valeurs de CEC et de S_s sont dépendantes de la nature des argiles, mais aussi des charges électriques superficielles développées par les matières organiques ;
- La valeur de bleu et la surface spécifique des Marnes bleues MBA-0, nettement inférieures aux valeurs des autres échantillons, sont à mettre en relation avec le pourcentage en carbonates dont le pouvoir d'adsorption est négligeable par rapport aux argiles. Si on compare les valeurs de bleu des 2 niveaux de Marnes bleues (MBA-0 et MBA-1) ramenées à la teneur en argile, les résultats sont quasi identiques ;
- Les Marnes bleues présentent des indices de plasticité I_p et de retrait $I_R = w_L - w_R$ supérieurs aux Argiles vertes, indiquant ainsi une aptitude potentielle au gonflement légèrement plus importante. Ces observations s'accordent avec les résultats obtenus par Parcevaux (1980).

1.4.2.2 Limites de retrait

Les différentes méthodes - par mesure de la variation de hauteur, de volume, et par traitement d'images - de détermination de la limite de retrait, relative à un sol remanié ou à un sol intact, donnent des résultats comparables (exemple des Argiles vertes de Romainville : w_R compris entre 15 et 17 %). Cependant, pour les Marnes bleues d'Argenteuil la limite de retrait déterminée à partir des sols remaniés donne des valeurs plus faibles que celles obtenues sur les sols intacts. Ceci peut être expliqué par le fait que la rigidité de la microstructure due à la présence d'un réseau de calcite très dense s'oppose au retrait des argiles dans le sol intact (cf. chapitre 5). Lorsque le sol est remanié, la rupture des liaisons carbonatées entre les minéraux permet aux argiles de se rétracter librement.

Dans le cas du traitement d'images un essai a été réalisé sur un échantillon taillé parallèlement et perpendiculairement au litage. Une légère anisotropie du matériau est observée pour ces deux essais. Elle se traduit par des différences de retrait et de teneur en eau. La surface perpendiculaire au litage présente un retrait légèrement plus important et une limite de retrait plus faible que la surface parallèle au litage (Figure 1.4.14).

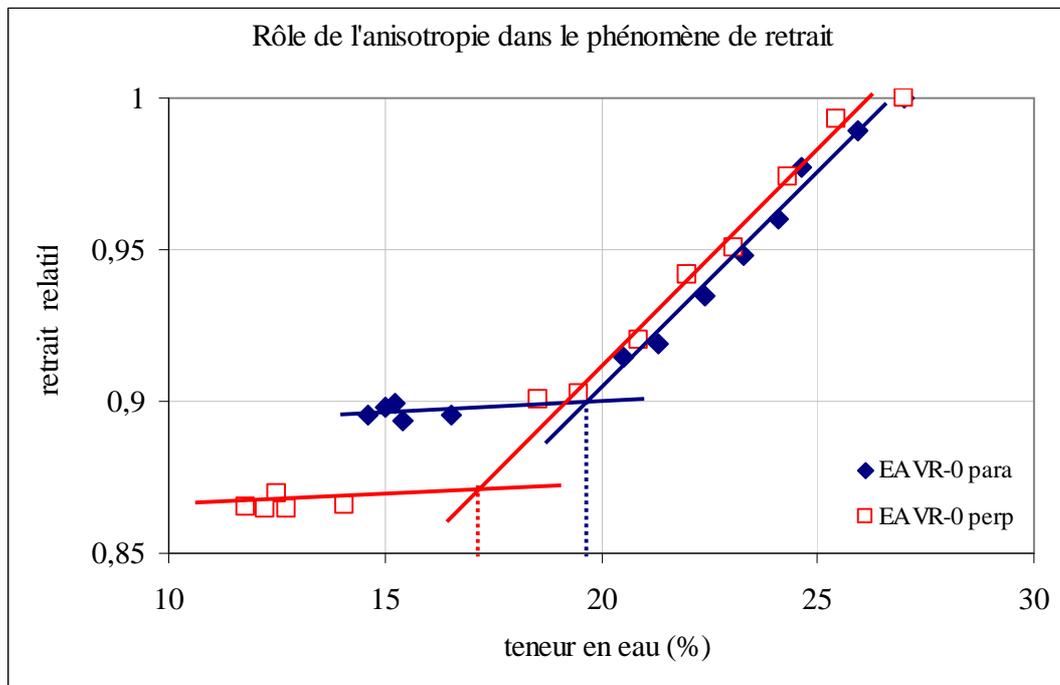
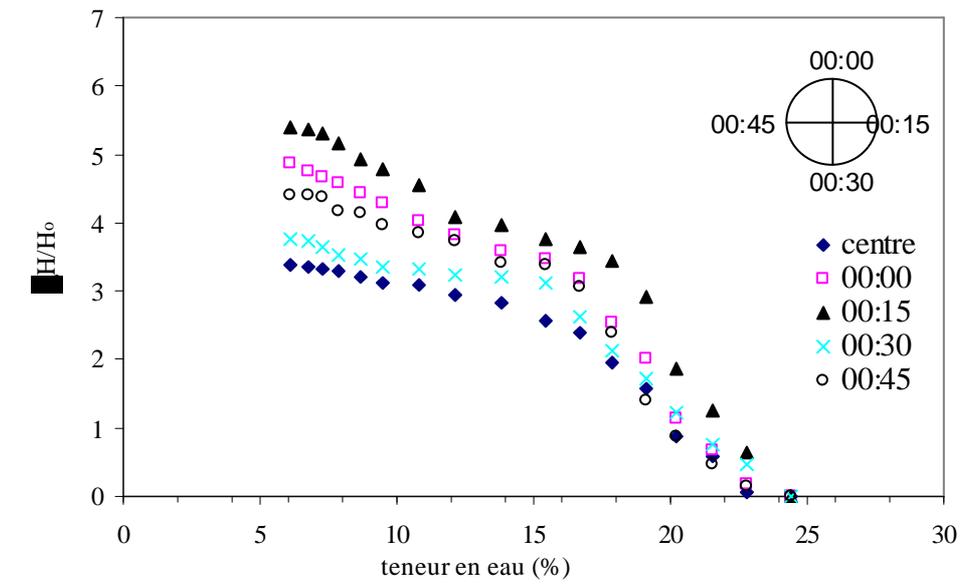
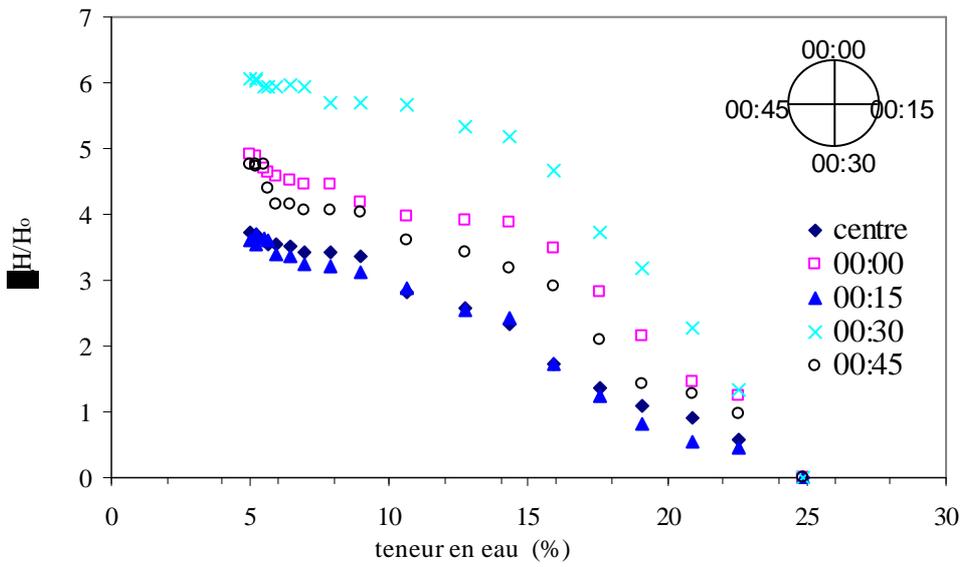


Figure 1.4.14 : Déformation latérale en fonction de la teneur en eau déterminée à partir du traitement d'images d'échantillons E-AVR-0 observés perpendiculairement et parallèlement au litage

La mesure de la limite de retrait effective sur le sol intact selon la norme française AFNOR XP P94-060-2 consiste à mesurer la variation de hauteur d'une éprouvette cylindrique extraite d'un échantillon intact, lors du séchage à l'air libre, puis à l'étuve. La limite de retrait effective est donc déterminée à partir de la courbe de retrait. Cependant, on a remarqué que les déformations verticales mesurées en différents points, à une teneur en eau donnée, ne sont pas identiques ; le retrait sur les bordures de l'échantillon est plus fort qu'au centre (Figure 1.4.15).



(a)



(b)

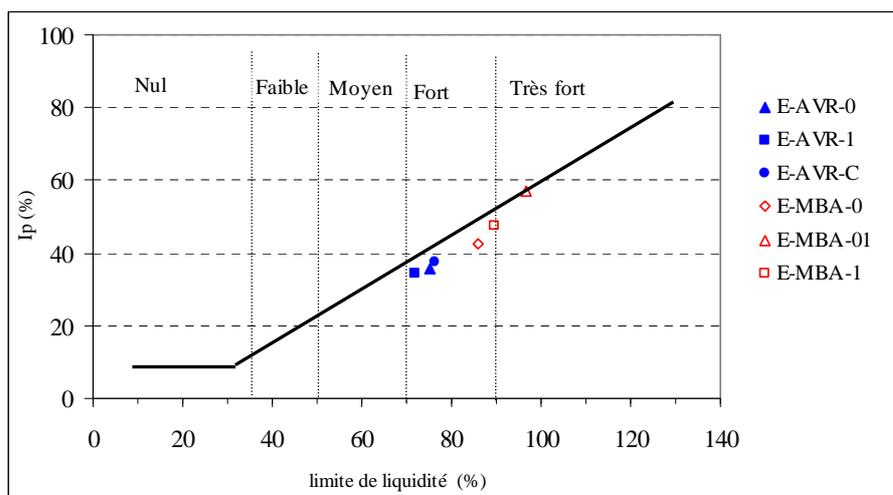
Figure 1.4.15 : Déformations verticales, en fonction de la teneur en eau, mesurées en différents points, pour des échantillons de E-AVR-0 ; (a) échantillon taillé perpendiculairement au litage, (b) parallèlement au litage

1.4.3 Caractérisation du potentiel de gonflement et de retrait par des méthodes indirectes

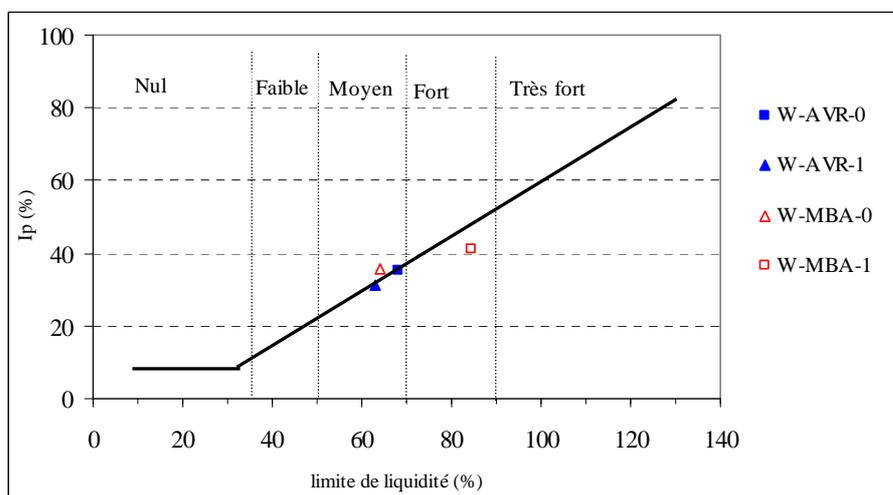
Le Tableau 1.4.8 et la Figure 1.4.16 présentent la caractérisation du potentiel de retrait-gonflement des sols étudiés selon des méthodes indirectes proposées par différents auteurs. Ces méthodes évaluent le potentiel de gonflement et de retrait des sols argileux à partir de mesures de paramètres géotechniques simples (cf annexe). D'une estimation à l'autre, à l'exception de la classification d'Altemeyer, les conclusions sont sensiblement identiques. Il en ressort que tous les sols ont un potentiel de retrait-gonflement moyen à très fort, celui des Marnes bleues étant généralement supérieur. Seule la classification d'Altemeyer donne un potentiel de gonflement faible quelque soit le sol analysé.

Tableau 1.4.8 : Comparaison des potentiels de gonflement et de retrait obtenus par des méthodes indirectes

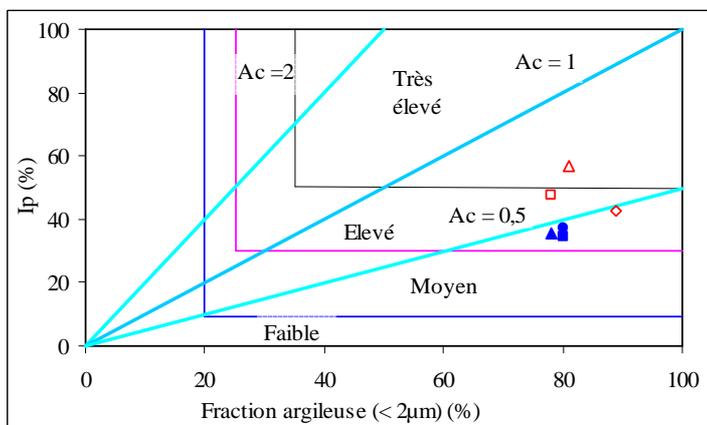
	<i>E-AVR-0</i>	<i>E-AVR-1</i>	<i>E-AVR-C</i>	<i>E-MBA-0</i>	<i>E-MBA-1</i>	<i>W-AVR-0</i>	<i>W-AVR-1</i>	<i>W-MBA-0</i>	<i>W-MBA-1</i>
Altemeyer (1955) (w_R)	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Seed et al. (1962) (I_p)	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Fort	Moyen	Moyen	Moyen	Fort
Ranganatham and Satyanaraya (1965) (I_R)	Fort à très fort	Fort	Fort à très fort	Très fort	Très fort	Fort	Fort	Fort	Très fort
Dakashanamurthy et Raman (1973) (I_p, I_R, w_L)	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Fort	Fort	Fort	Très fort
Holtz et Gibs (1956)	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort
Williams et Donaldson (1980) ($I_p, A, <2\mu m$)	Moyen	Moyen	Moyen	Fort	Fort	Moyen	Moyen	Moyen	Fort
BRE (1980) ($I_p, <2\mu m$)	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
Chassagneux et al. (1995) (V_{BS})	Très fort	Très fort	Très fort	Moyen	Très fort	Très fort	Fort	Fort	Très fort



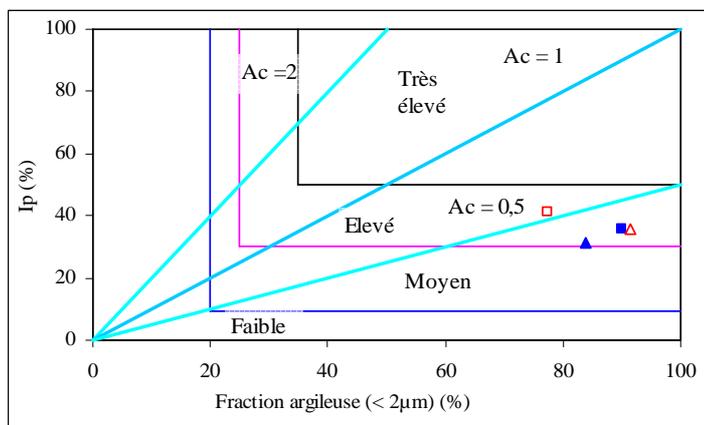
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 1.4.16 : Classification du potentiel de retrait-gonflement des sols étudiés : classification de Dakshanamurphy et Raman (1973) a) sols de l'Est, b) sols de l'Ouest ; classification de Williams et Donaldson (1980) c) sols de l'Est, d) sols de l'Ouest

1.4.4 Caractérisation géotechnique et étude statistique des profils des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) de Paris

1.4.4.1 Caractérisation géotechnique

Les limites d'Atterberg, la valeur de bleu et le % < 2 μ m ont été mesurés sur l'ensemble des échantillons des deux profils. Les résultats sont représentés sur les graphes de la Figure 1.4.17 et placés dans la charte du potentiel de gonflement des sols établie par Daksanamurthy et Raman (1973) à partir du diagramme de Casagrande ainsi que dans la classification de Williams et Donaldson (Figure 1.4.18). L'analyse des caractéristiques géotechniques confirme la continuité de faciès entre l'Est et l'Ouest de Paris, constatée pour les analyses minéralogiques, et met en évidence une certaine homogénéité de ces caractéristiques. Les variations enregistrées de la base au sommet de la formation ne sont vraiment importantes que dans la partie supérieure de la formation (à partir de 3 m).

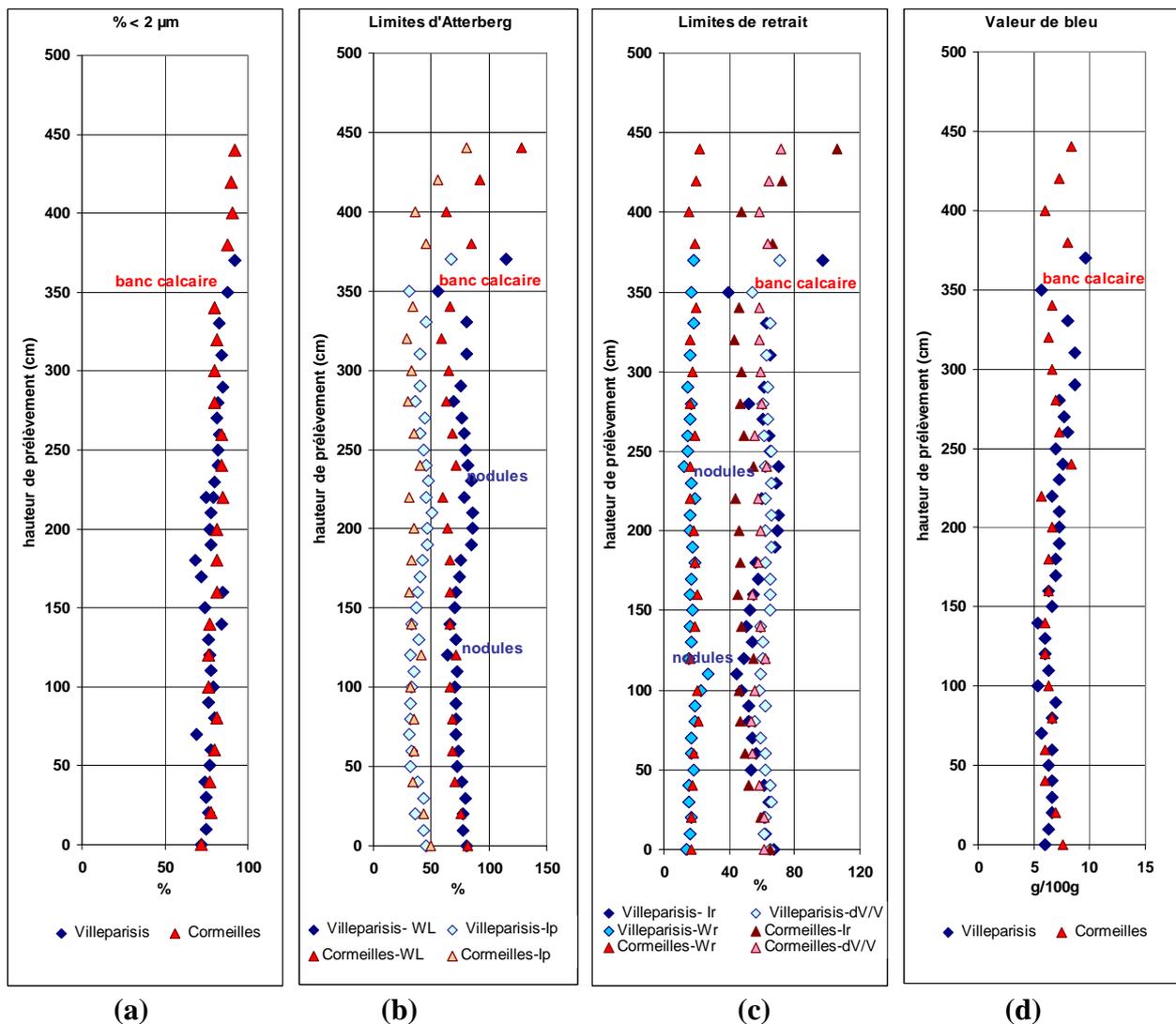
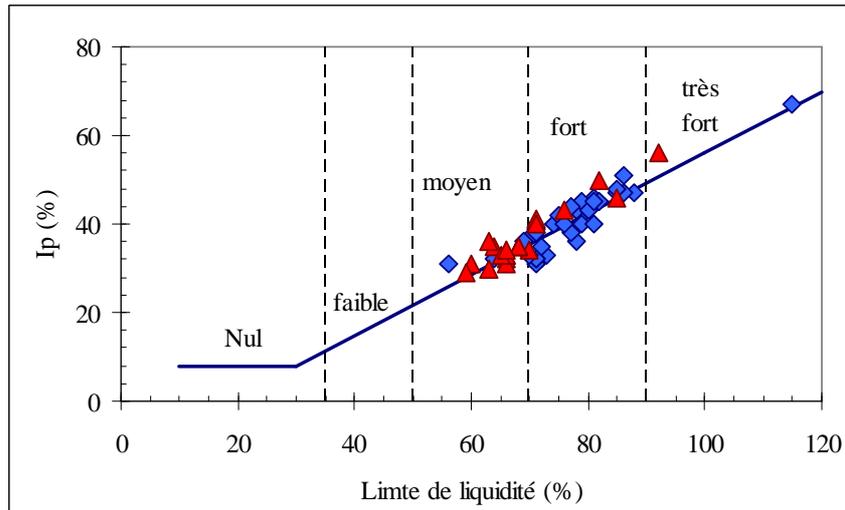
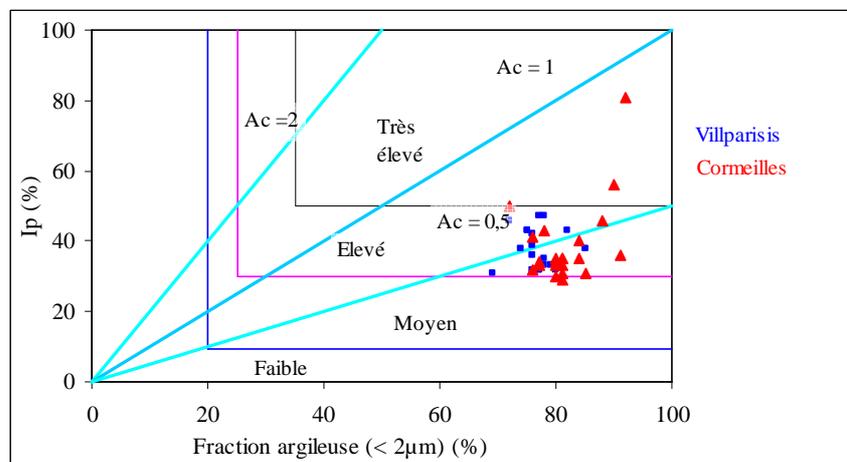


Figure 1.4.17 : Caractérisation géotechnique des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Est (Villeparisis-Le Pin) et de l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) ; (a) % < 2 μ m, (b) limites d'Atterberg (w_L , w_p , I_p), (c) limites de retrait (w_R , I_R , dV/V), (d) valeur de bleu



(a)



(b)

Figure 1.4.18 : Position des échantillons correspondant aux profils des 2 sites : a) charte du potentiel de gonflement des sols établie par Daksanamurthy et Raman (1973), (b) classification de Williams et Donaldson (1980)

- Le taux de particules inférieures à $2\ \mu\text{m}$ varie progressivement d'un pourcentage de l'ordre de 70 % à la base de la formation à plus de 90 % au sommet avec une augmentation plus marquée à partir de 3,50 m correspondant au niveau repère carbonaté ;
- Les limites de liquidité (w_L) varient de 60 à 90 % jusqu'au niveau repère avec de légères fluctuations (valeurs les plus faibles vers 1,20 m, les plus fortes entre 2 m et 2,50 m), augmentent de façon significative à l'Ouest, au sommet de la formation ;
- La même tendance est constatée pour l'indice de plasticité (I_p), l'indice de retrait (I_R) et les variations de volume (dV/V) alors que la limite de retrait (w_R) est quasi constante sur tout le profil ; elle est comprise entre 15 et 18 % ;
- Les valeurs de bleu sont comprises entre 6 et 8 et augmentent vers le sommet de la formation.

Les résultats des caractéristiques géotechniques confortent ceux de l'identification minéralogique. Les limites d'Atterberg témoignent de matériaux plus plastiques vers le

sommet de la formation en relation avec une augmentation du taux de particules inférieures à 2 µm et un pourcentage d'argiles plus important, plus particulièrement celui des argiles gonflantes. Les matériaux prélevés sur les 2 sites se classent parmi les sols à fort ou très fort potentiel de gonflement (Figure 1.4.18).

1.4.4.2 Etude Statistique

Tableau 1.4.9 : Caractéristiques géotechniques des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Est

Profondeur (cm)	V _{BS} (g/100g)	w _L (%)	I _p (%)	w _R (%)	I _R (%)	CO ₃ (%)	CEC (meq/100g)	% < 2µm (%)	Ac
0	7,3	88	47	18,0	70,0	13,0	19,54	77	0,61
10	6,0	79	42	15,6	63,4	14,5	16,04	76	0,55
20	6,0	81	46	13,9	67,1	14,5	16,04	72	0,64
30	6,3	78	43	15,8	62,2	14,5	16,91	75	0,57
40	6,7	78	36	16,7	61,3	15,0	17,79	76	0,47
50	6,7	80	43	15,6	64,4	14,5	17,80	75	0,57
60	6,6	77	38	15,5	61,5	13,0	17,77	74	0,51
70	6,3	72	32	18,4	53,6	14,0	16,90	77	0,42
80	6,7	73	33	16,6	56,4	13,5	17,82	78	0,42
90	5,7	71	31	16,7	54,3	14,0	15,14	69	0,45
100	6,7	71	32	18,8	52,2	14,5	17,83	80	0,40
110	7,0	71	32	18,9	52,1	13,5	18,72	76	0,42
120	5,3	70	33	22,6	47,4	14,0	14,26	79	0,42
130	6,3	72	35	27,4	44,6	16,0	16,92	78	0,45
150	6,0	71	39	16,7	54,3	13,5	16,04	76	0,51
160	5,3	66	33	15,9	50,1	10,0	14,26	84	0,39
170	6,7	70	37	17,6	52,4	11,0	17,81	74	0,50
180	6,3	71	38	16,1	54,9	11,5	16,91	85	0,45
190	7,0	74	40	16,5	57,5	12,5	18,72	72	0,56
200	7,0	75	42	18,9	56,1	10,5	18,67	68	0,62
210	7,3	85	47	17,2	67,8	13,0	19,61	78	0,60
220	7,3	86	47	16,4	69,6	10,5	19,58	77	0,61
230	7,3	86	51	15,9	70,1	12,5	19,56	78	0,65
250	7,3	85	48	16,5	68,5	9,0	19,59	80	0,60
260	7,7	82	45	12,1	69,9	7,0	20,46	82	0,55
270	7,0	80	43	14,9	65,1	6,5	18,68	82	0,52
280	8,0	79	40	14,5	64,5	7,5	21,39	83	0,48
290	7,7	77	44	16,2	60,8	11,0	20,50	81	0,54
300	7,3	69	36	16,7	52,3	16,0	19,61	82	0,44
310	8,7	76	40	14,7	61,3	9,5	23,17	85	0,47
330	8,7	81	40	15,8	65,2	13,0	23,17	84	0,48
390	9,6	115	67	18,0	97,0	13,0	25,78	92	0,73

Une étude statistique a été faite (Tableau 1.4.11 et Tableau 1.4.12) sur les données des Argiles vertes de Romainville le long des profils de prélèvement des 2 sites en éliminant les niveaux calcaires (nodules, bancs calcaires) et les échantillons dont les données sont incomplètes. Ainsi des populations de 32 et 20 individus sont retenues, respectivement pour les Argiles vertes de l'Est et de l'Ouest, dans l'analyse de 9 variables (Tableau 1.4.9 et Tableau 1.4.10).

Tableau 1.4.10 : Caractéristiques géotechniques des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Ouest

Profondeur (cm)	V _{BS} (g/100g)	w _L (%)	I _p (%)	w _R (%)	I _R (%)	CO ₃ (%)	CEC (meq/100g)	% < 2µm (%)	Ac
0	7,6	82	50	17,0	65	15,4	20,44	72,0	0,69
20	7,0	76	43	16,7	59	18,4	18,67	78,0	0,55
40	6,0	70	34	17,8	52	15,6	16,00	77,0	0,44
60	6,0	68	35	18,4	50	14,5	15,99	80,0	0,44
80	6,6	68	35	20,9	47	12,7	17,78	81,0	0,43
100	6,3	66	32	20,2	46	13,1	16,92	76,0	0,42
120	6,0	71	41	16,2	55	19,6	16,02	76,0	0,54
140	6,0	66	33	18,8	47	13,1	15,99	77,0	0,43
160	6,3	66	31	20,6	45	13,8	16,91	81,0	0,38
180	6,3	66	33	18,9	47	19,1	16,89	81,0	0,41
200	6,7	64	35	18,1	46	25,6	17,81	81,0	0,43
240	8,3	71	40	16,4	55	7,0	22,25	84,0	0,48
260	7,3	68	35	19,0	49	11,0	19,57	84,0	0,42
280	7,0	63	30	16,3	47	15,8	18,70	80,0	0,38
300	6,7	65	33	17,8	47	13,1	17,81	80,0	0,41
320	6,3	59	29	16,2	43	18,5	16,92	81,0	0,36
340	6,7	66	34	20,1	46	22,4	17,79	80,0	0,43
380	8,0	85	46	18,7	66	16,2	21,36	88,0	0,52
400	6,0	63	36	15,3	48	38,9	16,00	91,0	0,40
420	7,3	92	56	19,8	72	26,7	19,56	90,0	0,62

L'analyse des ces tableaux indique que la teneur en carbonates est le paramètre qui varie le plus parmi les 9 paramètres étudiés. Les Argiles vertes de l'Ouest ont un coefficient de variation très élevé (39 %) par rapport à celui des Argiles vertes de l'Est (20 %) (Tableau 1.4.11 et Tableau 1.4.12), qui s'explique par la contamination des niveaux voisins des bancs ou des nodules calcaires. On remarque également un coefficient de variation élevé pour l'indice de plasticité I_p dans les Argiles vertes de l'Ouest qui peut être lié aux valeurs de plasticité très élevées des Argiles vertes supérieures (au dessus du banc carbonaté).

Pour les sols des deux sites, de toutes les variables analysées, les résultats de la fraction argileuse sont les moins dispersés.

Tableau 1.4.11 : Résultats de l'analyse statistique effectuée sur les paramètres géotechniques de l'Argile verte de Romainville de l'Est

	V _{BS} (g/100g)	w _L (%)	I _p (%)	w _R (%)	I _R (%)	CO ₃ (%)	CEC (meq/100g)	% < 2µm (%)	Ac
Min	5,3	66,0	31,0	12,1	44,6	6,5	14,3	68,0	0,39
Max	9,6	115,0	67,0	27,4	97,0	16,0	25,8	92,0	0,73
Moyenne	6,9	77,8	40,6	16,9	60,9	12,4	18,5	78,3	0,52
Variance	0,9	79,5	53,4	7,0	94,6	6,2	6,4	25,0	0,01
Ecarte type	0,9	8,9	7,3	2,6	9,7	2,5	2,5	5,0	0,09
étendue	4,3	49,0	36,0	15,2	52,3	9,5	11,5	24,0	0,34
Coef. Variation (%)	14	11	18	16	16	20	14	6	16
N° d'individus	32								
N° de variables	9								

Tableau 1.4.12 : Résultats de l'analyse statistique effectuée sur les paramètres géotechniques de l'Argile verte de Romainville de l'Ouest

	V _{BS} (g/100g)	w _L (%)	I _p (%)	w _R (%)	I _R (%)	CO ₃ (%)	CEC (meq/100g)	% < 2µm (%)	Ac
Min	6,0	59,0	29,0	15,3	42,8	7,0	16,0	72,0	0,36
Max	8,3	92,0	56,0	20,9	72,2	38,9	22,3	91,0	0,69
Moyenne	6,7	69,8	37,1	18,2	51,6	17,5	18,0	80,9	0,46
Variance	0,5	66,4	48,9	2,7	65,3	47,8	3,5	22,3	0,01
Ecarte type	0,7	8,1	7,0	1,7	8,1	6,9	1,9	4,7	0,09
étendue	2,3	33,0	27,0	5,7	29,4	31,8	6,3	19,0	0,34
Coef. Variation (%)	10	12	19	9	16	39	10	6	19
N° d'individus	20								
N° de variables	9								

1.4.5 Corrélations entre différents paramètres géotechniques

Des corrélations linéaires entre la valeur de l'essai au bleu et les résultats des essais conventionnels (limites d'Atterberg, pourcentage de particules < 2µm et indice de Skempton) des sols étudiés sont données dans le Tableau 1.4.13. Le coefficient de corrélation r^2 est calculé à partir d'un nombre de points très faible variant de 4 à 7 points, sa représentativité est donc toute relative.

Les valeurs ne sont données que lorsqu'elles sont supérieures à 0,8.

Tableau 1.4.13 : Corrélations entre valeur de bleu et paramètres géotechniques

Echantillons (nombre de points)	r^2				Indice de Skempton
	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)	<2µm (%)	
Est (ensemble) (5)				0,97	
Ouest (ensemble) (4)	0,91	0,99			0,84
Ensemble des 2 carrières (9)				0,84	
Est – sans E-MBA-0 (4)		0,96			
Ouest sans W-MBA-0 (3)	0,99	1,00	0,97		0,99
Ensemble des 2 carrières sans MBA-0(7)		0,99			

Echantillons (nombre de points)	r^2				Indice de Skempton
	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	$<2\mu m$ (%)	
Seulement – AVR (5)	0,97	1,00			0,99
Seulement – MBA (4)				0,97	

Tourenq et Tran Ngoc Lan, 1991, ont noté que la corrélation entre les essais conventionnels et l'essai au bleu est plus dispersée lorsqu'il s'agit de mélanges d'argiles que lorsque l'on étudie un seul type d'argile. Cependant, de bonnes corrélations apparaissent si l'on dissocie les Argiles vertes des Marnes bleues, ou si l'on considère une seule carrière à condition de mettre à l'écart MBA-0 dont le pourcentage en carbonates est responsable de son comportement particulier. Ainsi :

- Les coefficients de corrélations entre la valeur de bleu et la limite de liquidité w_L , la valeur de bleu et la limite de plasticité w_p , pour les matériaux de l'Ouest sont supérieures à 0,90 ;
- Des coefficients de corrélations supérieurs à 0,90 ont aussi été obtenus pour les mêmes paramètres en ne considérant que les Argiles vertes ;

De même des corrélations entre teneur en carbonates d'une part et limites d'Atterberg, indice de plasticité, indice de retrait et pourcentage de fines ($< 2\mu m$) d'autre part, ont été calculées (Tableau 1.4.14).

Tableau 1.4.14 : Corrélations entre teneur en carbonates et paramètres géotechniques

Echantillons	r^2						
	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	I_R (%)	w_R	w_{RE}	$<2\mu m$ (%)
Est (ensemble) (5)					0,94	0,93	
Ouest (ensemble) (4)							
Ensemble des 2 carrières (9)							
E- AVR seulement (3éch)	1	0,96	0,9	0,96			
Seulement- AVR							
Seulement - MBA							0,94

- Les coefficients de corrélation obtenus entre la teneur en carbonates d'une part et la limite de liquidité, w_L , la limite de plasticité, w_p , l'indice de plasticité et l'indice de retrait d'autre part sont satisfaisants ($> 0,9$) lorsque l'on considère seulement les Argiles vertes de l'Est. Cependant, on doit s'interroger sur la représentativité, étant donné le faible nombre de points qui a servi au calcul ;
- Il ressort aussi une assez bonne corrélation entre la teneur en carbonates d'une part et la limite de retrait sur échantillon remanié (w_R) d'autre part ou entre la teneur en carbonates d'une part et la limite de retrait sur échantillon intact (w_{RE}) pour les sols de l'Est ($> 0,93$).

1.4.6 Corrélations pour l'ensemble des paramètres géotechniques des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Est et de l'Ouest

Les corrélations entre les différents résultats des essais d'identification (limites d'Atterberg, pourcentage de particules < 2µm, CEC, teneur en carbonate, indice de Skempton) des échantillons des deux profils sont données dans les Tableau 1.4.15 et Tableau 1.4.16

Les matrices de corrélations montrent une corrélation modérée, sur une population de 32 individus à l'Est et 20 individus à l'Ouest, entre w_L et V_{BS} , I_p et V_{BS} , I_R et V_{BS} , C_2 et V_{BS} , I_p et CEC, w_L et CEC, I_f et CEC, C_2 et CEC et des corrélations élevées entre w_L et I_R , I_p et I_R , w_L et Ac, I_R et Ac, I_R et Ac pour les Argiles vertes de l'Est et de l'Ouest. Aucune corrélation n'apparaît entre les carbonates et les autres paramètres.

Tableau 1.4.15 : Matrice des coefficients de corrélation obtenue pour les Argiles vertes de Romainville de l'Est

	V_{BS}	w_L	I_p	w_R	I_R	% CO_3	CEC	C_2 % < 2µm	Ac
V_{BS}	1,00	0,68	0,62	-0,23	0,68	-0,33	1,00	0,56	0,42
w_L	0,68	1,00	0,93	-0,17	0,96	-0,14	0,68	0,38	0,81
I_p	0,62	0,93	1,00	-0,26	0,92	-0,23	0,62	0,34	0,92
w_R	-0,23	-0,17	-0,26	1,00	-0,43	0,47	-0,23	-0,10	-0,26
I_R	0,68	0,96	0,92	-0,43	1,00	-0,25	0,68	0,38	0,81
% CO_3	-0,33	-0,14	-0,23	0,47	-0,25	1,00	-0,33	-0,31	-0,14
CEC	1,00	0,68	0,62	-0,23	0,68	-0,33	1,00	0,56	0,42
% < 2µm	0,56	0,38	0,34	-0,10	0,38	-0,31	0,56	1,00	-0,06
Ac	0,42	0,81	0,92	-0,26	0,81	-0,14	0,42	-0,06	1,00

Tableau 1.4.16 : Matrice des coefficients de corrélation obtenue pour les Argiles vertes de Romainville de l'Ouest

	V_{BS}	w_L	I_p	w_R	I_R	% CO_3	CEC	C_2 % < 2µm	Ac
V_{BS}	1,00	0,58	0,56	-0,04	0,59	-0,30	1,00	0,26	0,48
w_L	0,58	1,00	0,95	0,14	0,98	0,03	0,58	0,21	0,87
I_p	0,56	0,95	1,00	-0,04	0,97	0,19	0,56	0,22	0,93
w_R	-0,04	0,14	-0,04	1,00	-0,06	-0,28	-0,04	0,00	-0,08
I_R	0,59	0,98	0,97	-0,06	1,00	0,09	0,59	0,21	0,90
% CO_3	-0,30	0,03	0,19	-0,28	0,09	1,00	-0,30	0,47	0,04
CEC	1,00	0,58	0,56	-0,04	0,59	-0,30	1,00	0,26	0,48
% < 2µm	0,26	0,21	0,22	0,00	0,21	0,47	0,26	1,00	-0,13
Ac	0,48	0,87	0,93	-0,08	0,90	0,04	0,48	-0,13	1,00

1.5 Conclusion

Des essais pétrophysiques ont été réalisés au laboratoire sur des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil prélevées dans la carrière de Villeparisis-Le Pin (est de Paris) et la carrière de Cormeilles en Paris (ouest de Paris). L'analyse de l'ensemble des résultats de cette étude permet d'énoncer plusieurs caractéristiques principales de ces sols.

Les résultats de l'étude minéralogique montrent que les échantillons des deux formations, les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil, des deux carrières, ont une composition minéralogique voisine. Les Argiles vertes supérieures et inférieures sont composées essentiellement d'illite, en quantité moindre de smectites et d'interstratifiés illite-smectite et pour une plus faible part de kaolinite. Il en est de même pour les Marnes bleues supérieures mais avec une quantité de kaolinite encore plus faible. Les Marnes bleues inférieures, par contre, contiennent essentiellement des argiles fibreuses (attapulgite principalement), une faible quantité de smectites et d'illite, la kaolinite est très peu ou pas représentée. Les minéraux non argileux sont représentés par du quartz, des carbonates, des traces de feldspaths, de micas et de pyrites (dans les Marnes bleues). Le quartz est présent dans tous les échantillons en quantité significative, à l'exception des Marnes bleues inférieures. Les carbonates sont représentés par de la dolomite dans les Argiles vertes prélevées à l'Est et par de la calcite dans celles prélevées à l'Ouest, et par une forte proportion de calcite, dans les Marnes bleues.

La comparaison des profils d'AVR des 2 sites met en évidence une continuité des faciès d'un site à l'autre, avec la présence de niveaux repères carbonatés, un enrichissement en minéraux argileux et en carbonates, essentiellement de la dolomite dans la partie supérieure, s'accompagnant d'un appauvrissement en quartz du bas vers le haut de la formation.

Les résultats des analyses physiques et géotechniques montrent que l'ensemble des sols prélevés dans les deux gisements ont une granulométrie fine (plus de 78 % < 2 μ m) ; ils sont plastiques, voire très plastiques, peu denses, avec un potentiel de gonflement fort à très fort. L'étude des profils des Argiles vertes des 2 sites met en évidence un enrichissement en particules fines vers le sommet, qui s'accompagne d'une augmentation des indices de plasticité et de retrait.

Les Marnes bleues présentent des indices de plasticité I_p et de retrait $I_R = w_L - w_R$ supérieurs à ceux des Argiles vertes, qui devraient être en relation avec un pouvoir de gonflement légèrement plus important selon certaines méthodes de classifications. Or les résultats obtenus sur les gonflements libres démontrent le contraire (cf chapitre 3). Ceci montre que les relations déterminées à partir d'échantillons remaniés ne sont pas toujours adaptées pour les sols naturels.

Chapitre 2 Courbes de drainage et d'humidification des matériaux étudiés

2.1 Introduction

L'étude expérimentale entreprise a pour but de mesurer la réponse des sols étudiés à des sollicitations hydriques. Elle nécessite donc une bonne connaissance des conditions hydriques initiales et des caractéristiques des transferts hydriques. Les courbes de drainage et d'humidification renseignent sur l'importance des transferts hydriques dans les matériaux en fonction des paliers de succion imposés et permettent de définir la succion correspondant à une valeur de teneur en eau donnée.

Pour mener à bien notre étude nous avons établi expérimentalement, pour les Argiles vertes (E-AVR-0 et W-AVR-0) et pour les Marnes bleues (E-MBA-1), les courbes suivantes :

- succion - teneur en eau (ou courbes de rétention) ;
- succion - degré de saturation ;
- succion - indice des vides ;
- teneur en eau - indice des vides.

Auxquelles se rajoutent les courbes de rétention (succion - teneur en eau) des colluvions (E-AVR-C).

L'étude du comportement hydromécanique des sols plastiques non saturés nécessite l'utilisation de succions très élevées correspondant aux succions auxquelles ces matériaux peuvent être soumis. La recherche bibliographique réalisée (cf.annexe) a montré la nécessité d'étudier le comportement de ces matériaux dans une gamme de succion très étendue, de la saturation jusqu'à plusieurs centaines de MPa. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'employer au moins deux techniques d'imposition de la succion. Dans le cadre des essais qui sont présentés par la suite, deux méthodes ont été employées : la méthode osmotique qui couvre la plage des faibles succions et la méthode par phase vapeur pour des succions plus élevées. La gamme totale de succion est comprise entre 1 et 305,5 MPa. Chaque courbe succion-teneur en eau est le résultat d'un drainage (paliers de succion croissants) ou d'une humidification (paliers décroissants).

En parallèle, des mesures de volume ont été réalisées pour certains paliers de succion. Elles permettent d'établir les courbes succion-variation d'indice des vides.

2.2 Protocoles expérimentaux

Les différentes méthodes expérimentales d'imposition et de mesure de succion sont exposées en bibliographie (cf. annexe). Dans ce paragraphe ne sont présentés que les protocoles expérimentaux utilisés dans cette étude.

2.2.1 Mesure de la succion naturelle

La succion des échantillons dans les conditions de prélèvement est obtenue par la méthode du papier-filtre. L'essai est réalisé selon la procédure exposée par Parcevaux (1980). Elle consiste à introduire trois papiers filtres préalablement mouillés entre deux demi-échantillons parallélépipédiques de quelques centimètres de côté et à emballer l'ensemble dans une feuille de plastique souple et à le placer dans une enceinte close à atmosphère humide. L'enceinte est placée dans une salle à une température de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Une fois l'équilibre atteint, l'échantillon est déballé et la teneur en eau du papier-filtre central est déterminée par séchage dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant. La succion matricielle correspondant à cette teneur en eau, évaluée en utilisant la courbe d'étalonnage du papier, est égale à celle du sol. Le papier-filtre utilisé est du papier Whatman n° 42 initialement humecté. Les suctions ont été déterminées à partir de la courbe d'étalonnage du papier filtre établie par Parcevaux (1980, Figure 2.2.1).

L'hypothèse fondamentale de cette méthode est que l'état de l'échantillon n'est pas modifié par l'expérience. Afin de vérifier cette hypothèse, la teneur en eau avant et après expérience d'un certain nombre d'échantillons a été déterminée. Le Tableau 2.2.1 montre que l'écart de teneur en eau entre les deux états ne dépasse pas 0,5% de teneur en eau, soit moins de 2% d'erreur relative.

Tableau 2.2.1 : Mesure de la teneur en eau avant et après essai de succion au papier-filtre

E-AVR-0		W-AVR-0		E-MBA-1	
<i>w</i> avant essai (%)	<i>w</i> après essai (%)	<i>w</i> avant essai (%)	<i>w</i> après essai (%)	<i>w</i> avant essai (%)	<i>w</i> après essai (%)
28,38	28,08	32,90	32,56	38,33	38,50
24,11	24,46	31,97	31,73	38,14	37,80
23,97	24,25				
23,80	24,06				

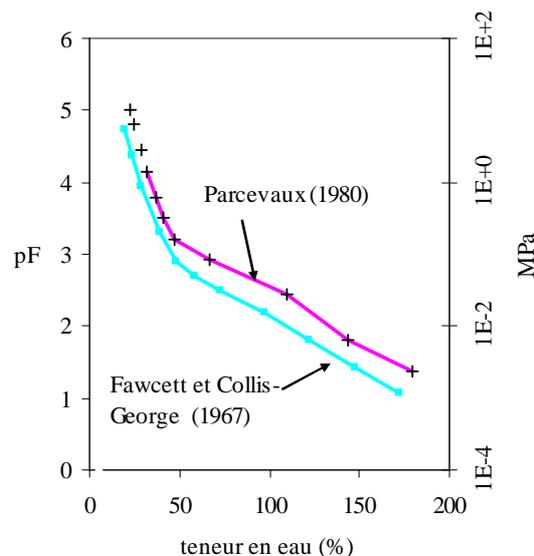


Figure 2.2.1 : Courbe d'étalonnage du papier filtre Whatman n° 42 (Parcevaux 1980)

2.2.2 Méthode Osmotique

Trois paliers de succion ont été imposés par cette méthode, à savoir : 1, 2 et 4 MPa. L'échantillon entouré d'une membrane de dialyse est placé dans une solution de polyéthylèneglycol (PEG 20000) dont la concentration est connue. La relation entre la succion et la concentration en PEG 20000 ($s = 11c^2$, cf. annexe) permet de déterminer la succion imposée.

Les solutions osmotiques sont préparées à partir d'eau distillée et sont utilisées après un jour de fabrication pour permettre la stabilisation de la densité de la solution. Tout au long de l'expérience, les solutions sont placées sur un agitateur magnétique, avec maintien constant de la concentration par ajustement du niveau avec de l'eau distillée si nécessaire.

Pour chaque succion choisie, le dispositif est démonté après un temps d'équilibrage de 3 semaines environ et la teneur en eau de l'échantillon est déterminée. Pour chaque palier de succion au moins deux éprouvettes ont été testées.

2.2.3 Méthode de la pression de vapeur imposée par des solutions salines saturées

La méthode des solutions salines saturées a été employée pour imposer des paliers de succion jusqu'à 305,5 MPa. Les échantillons sont placés dans des dessiccateurs en verre contenant à leur base différentes solutions salines sursaturées et agitées en permanence. Ces dessiccateurs, hermétiquement clos, sont plongés dans un bain thermostaté à $25^\circ\text{C} \pm 0,1$ (Figure 2.2.2). L'état d'équilibre hydrique de l'échantillon pour chaque palier de succion imposé, est déterminé par pesées régulières des échantillons jusqu'à poids constant.



Figure 2.2.2 : Dispositif d'imposition de la succion par phase vapeur

Différentes solutions salines saturées sont utilisées, elles sont présentées dans le Tableau 2.2.2. On remarque que la valeur de l'humidité relative pour un sel donné peut varier de manière importante suivant les auteurs. C'est le cas pour $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (2,3 % de différence selon les sources citées par Delage et al. 1998). En effet, Delage et al. (1998) ont comparé les valeurs d'humidité relative fournies par différentes sources, et ont remarqué que, pour la majorité des sels, la différence est comprise entre 1 et 2 % mais qu'elle atteint 3% dans le cas de $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Les incertitudes engendrées sur la succion par cette imprécision peuvent être évaluées à partir de la loi de Kelvin (cf. annexe). Ainsi l'incertitude absolue sur la succion en MPa est égale à l'incertitude sur l'humidité relative multipliée par la constante RT/Mg

(= 137,837 MPa à 20°C). C'est-à-dire que 1 % d'incertitude relative sur l'humidité entraîne 1,38 MPa d'incertitude absolue sur la succion, ce qui est très significatif pour les faibles succions (inférieures à 10 MPa). Il semble ainsi qu'au-dessous d'une succion de 10 MPa, la méthode des solutions salines n'est pas précise. Néanmoins, nous avons employé deux sels pour imposer des succions inférieures à 10 MPa afin de couvrir la gamme de succion qui ne peut être imposée par la méthode osmotique. Le choix des sels sélectionnés s'est porté sur ceux qui sont les moins sensibles aux variations de température.

Tableau 2.2.2 . Solutions salines saturées utilisées

Sel	Humidité Relative (%)			Valeur retenue	
	à 20 °C	à 25 °C	à 30 °C	HR (%) à 25 °C	Succion (MPa)
K ₂ Cr ₂ O ₇		97,8 ^m		97,8	3,1
CuSO ₄ ,5H ₂ O	98 ^t ; 95,7 ^d		98 ^p	95,7	6,2
BaCl ₂ , 2H ₂ O		90,12 ^m		90,12	14,6
(NH ₄) ₂ SO ₄	81 ^f ; 81,0 ^{s,t}	80 ^f ; 81,1 ^{s,t} ; 81 ^c ; 79,97 ^m	80 ^f ; 81,1 ^{s,t}	81	29,5
NaNO ₂	66 ^{i,s,t}	65 ^{i,s,t}	63 ^{i,s,t}	65	60,4
K ₂ CO ₃ , 2H ₂ O	44 ^{f,s}	43,2 ^c ; 43 ^{f,s} ; 42,76 ^m	43 ^{f,s}	43	118,2
CaCl ₂ , 6H ₂ O	36,5 ^t	29 ^c ; 28,98 ^m		29	173,5
LiCl	12 ^{i,s}	12 ^{i,s} ; 11,3 ^c ; 11,05 ^m	12 ^{i,s}	11,3	305,5

Références: *b*-Multon et al., (1991) ; *c*-CRC handbook (1999) ; *d*- Delage et al., (1998) ; *p* -Parcevaux (1980) ; *f*, *s*, *t*_ respectivement NF X 15 014, Schneider (1960), Tessier (1975) d'après Delage et al.,(1998).

2.2.4 Mesure des variations de volume

Parallèlement aux mesures de teneur en eau en fonction de la succion imposée, nous avons effectué, pour certains paliers de succion, des mesures du volume total des échantillons. Ces valeurs ont été obtenues en utilisant un volumètre à mercure qui permet de calculer le volume total des échantillons à partir d'une pesée hydrostatique dans le mercure avec une précision de 5 mm³ pour un échantillon de 10 cm³ (Daupley, 1997).

2.3 Courbe de rétention de l'Argile verte

Les courbes de rétentions de l'Argile verte de l'Est (E-AVR-0) et de l'Ouest (W-AVR-0) ont été déterminées en imposant aux échantillons des succions comprises entre 1 et 305,5 MPa et en mesurant les teneurs en eau obtenues.

2.3.1 Méthode osmotique

Sur le Tableau 2.3.1 sont données les teneurs en eau finales de tous les échantillons d'Argiles vertes de Romainville, obtenues par la méthode osmotique. On a utilisé plusieurs échantillons

pour chaque valeur de succion afin d'obtenir une moyenne représentative. Au début de l'essai tous les échantillons sont à teneur en eau naturelle (de prélèvement) de l'ordre de 27,5 % pour l'Argile verte de l'Est et de 32 % pour celle de l'Ouest. La succion mesurée par la méthode du papier-filtre est pour l'argile de l'Est et celle de l'Ouest, respectivement de 750 kPa et 185 kPa.

Tableau 2.3.1 : Méthode osmotique-échantillons d'Argiles vertes de Romainville

E-AVR-0	1 MPa	2 MPa	4 MPa
w ₁ (%)	26,45	23,42	19,00
w ₂ (%)	26,67	23,92	19,24
w ₃ (%)			18,91
w _{moyenne} (%)	26,56	23,67	19,05

W-AVR-0	1 MPa	2 MPa	4 MPa
w ₁ (%)	29,25	27,2	24,87
w ₂ (%)	29,14	27,25	24,77
w ₃ (%)	29,15	27,34	24,86
w ₄ (%)		27,03	
w _{moyenne} (%)	29,18	27,21	24,83

L'analyse du tableau permet de faire les remarques suivantes :

- une variation de teneur en eau significative comprise entre 0,5 et 8,2 points pour E-AVR-0 et entre 2,7 et 7,8 points pour W-AVR-0 est enregistrée, lorsque la succion augmente de sa valeur initiale (de prélèvement) à 4 MPa.
- à une succion donnée, les teneurs en eau des Argiles vertes de l'Est et de l'Ouest sont différentes. Cette différence peut peut-être s'expliquer par l'influence de la teneur en eau initiale sur le comportement hydrique du sol. Ainsi Loiseau (2001) étudiant l'influence de la teneur en eau initiale sur la courbe de rétention du mélange Kunigel/sable compacté à $w_i = 10$ et 8 % ($\gamma_d = 20,3 \text{ kN/m}^3$) a constaté que la teneur en eau pour les échantillons compactés à $w_i = 8$ % est inférieure de 1 à 2 % à celle des échantillons compactés à une teneur en eau de 10 %. Cette différence augmente lorsque la succion imposée est faible.

2.3.2 Courbes obtenues par la méthode en phase vapeur

Les échantillons d'Argiles vertes ont suivi un cycle séchage-humidification. En partant de l'état naturel (E-AVR-0 : $s = 750 \text{ kPa}$, $w = 27,5 \%$, W-AVR-0 : $s = 400 \text{ kPa}$, $w = 31 \%$) ils ont subi un séchage progressif en appliquant des paliers de succion croissants, suivi d'une humidification suivant des paliers de succion décroissants.

Le chemin complet « séchage – humidification » emprunté par chaque échantillon est le suivant (succion en MPa) :

E-AVR-0 : 3,1 → 14,6 → 29,5 → 60,4 → 118,2 → 173,5 → 305,5 → 118,2 → 29,5 → 3,1
W-AVR-0 : 6,2 → 14,6 → 29,5 → 60,4 → 118,2 → 173,5 → 305,5 → 173,5 → 118,2 → 60,4 → 29,5 → 6,2

Afin de vérifier la répétitivité des résultats, une deuxième série d'essais a été entreprise pour l'Argile verte de l'Est en empruntant le chemin de « séchage – humidification » suivant :

14,6 → 29,5 → 60,4 → 118,2 → 173,5 → 305,5 → 118,2 → 29,5 → 3,1

Pour chaque chemin, deux séries de deux ou trois échantillons sont utilisées, l'une étant réservée seulement à la mesure de la teneur en eau et l'autre à la mesure en parallèle du volume du sol.

Dans la Figure 2.3.1 sont présentées les courbes de cinétique de déshydratation et d'hydratation par phase vapeur des échantillons des Argiles vertes de l'Ouest. Lorsque les échantillons sont en phase de déshydratation, la teneur en eau diminue graduellement avec un temps de stabilisation plus long pour les faibles succions. Il est en effet compris entre 10 jours, pour les succions supérieures à 29,5 MPa, à plus de 40 jours pour les faibles succions. Lors de l'hydratation de ces mêmes échantillons, le phénomène inverse est observé : lorsque la succion diminue de 305,5 MPa à 15 MPa, la teneur en eau augmente rapidement et se stabilise au bout de 10 jours. Par contre, le temps de stabilisation devient beaucoup plus long pour les faibles succions (plus de 60 jours).

La même cinétique de déshydratation-hydratation est observée pour les échantillons d'Argiles vertes de l'Est.

L'ensemble des courbes de drainage-humidification des échantillons des Argiles vertes inférieures de l'Est (E-AVR-0) et de l'Ouest (W-AVR-0) est présenté sur la Figure 2.3.2. On remarque :

- pour les Argiles vertes des deux sites de prélèvement, les courbes des différents échantillons sont confondues, montrant une certaine homogénéité du matériau et une répétitivité des résultats. La comparaison des courbes des deux séries d'échantillons de l'Est permet aussi d'apprécier la très grande homogénéité des transferts hydriques ; le léger décalage en teneur en eau observé à 14,6 MPa sur la deuxième série d'échantillons (Figure 2.3.2a) s'explique par la différence de teneur en eau initiale.

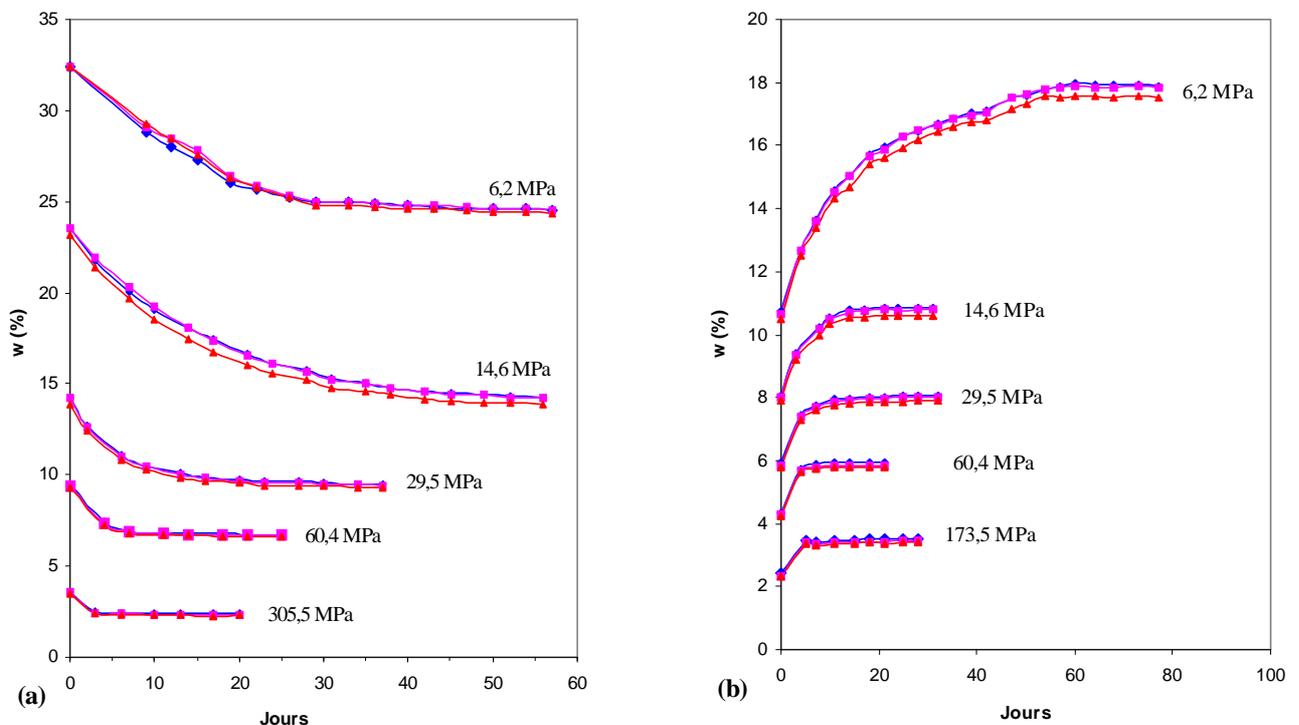


Figure 2.3.1 : Drainage (a) et humidification (b) par phase vapeur des échantillons d'Argile verte de l'Ouest

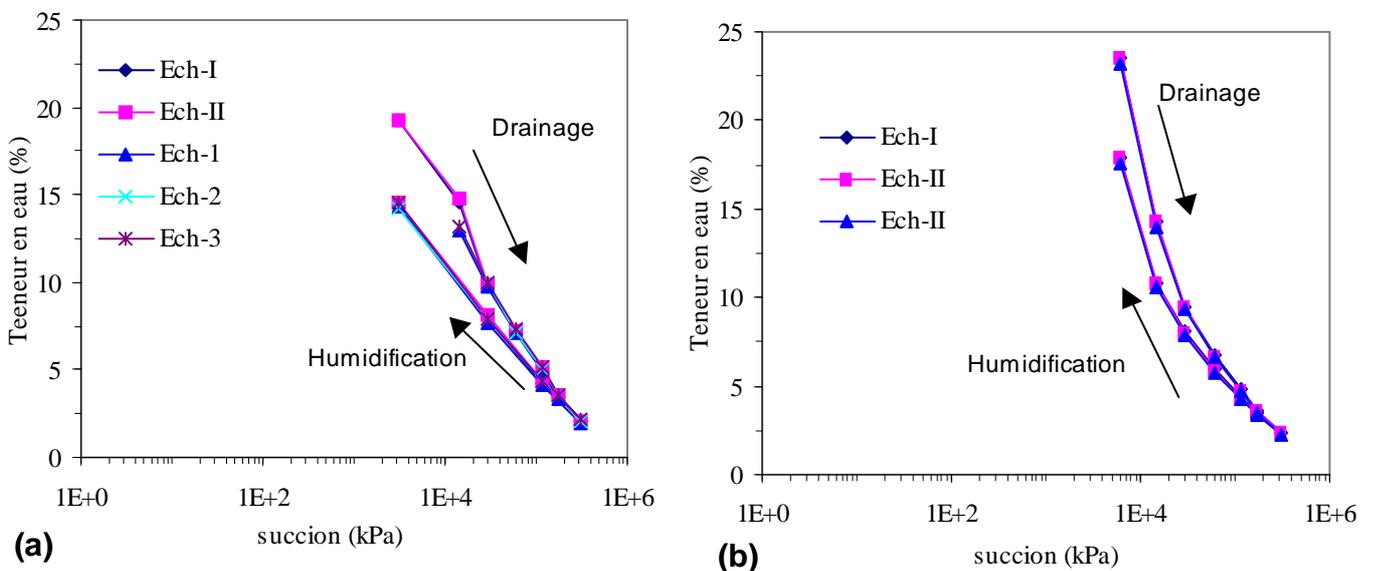


Figure 2.3.2 : Courbes de rétention de l'Argile verte de Romainville par la méthode en phase vapeur : (a) Argiles vertes de l'Est, carrière de Villeparisis-Le Pin ; (b) Argiles vertes de l'Ouest, carrière de Cormeilles-en-Parisis

- en condition de drainage, les courbes montrent, pour des succions comprises entre 3,1 (6,2 pour W-AVR-0) et 29,5 MPa, des variations de teneur en eau significatives (supérieures à 4 points entre paliers de succion) ; pour des succions comprises entre 29,5 MPa et 118,2 MPa les variations de teneur en eau restent significatives (supérieures à 2 points). Au-delà de 118,2 MPa l'augmentation de succion entraîne une diminution encore plus faible de la teneur en eau pondérale. L'écart maximal de teneur en eau entre les derniers paliers de succion les plus forts est de l'ordre de 1,4 % pour les Argiles vertes de l'Est et de l'ordre de 1,2 % pour les Argiles vertes de l'Ouest.
- une quasi réversibilité entre le drainage et l'humidification pour les succions supérieures à 100 MPa ; en dessous de cette valeur les chemins de drainage et d'humidification se séparent présentant ainsi un phénomène d'hystérésis qui s'amplifie vers les faibles succions obtenues par la méthode en phase vapeur. Entre les courbes de drainage et d'humidification, l'écart de la teneur en eau est supérieur à 4 % pour E-AVR-0 et 5 % pour W-AVR-0.

Sur la Figure 2.3.3 sont reportées les courbes de drainage-imbibition obtenues par les deux méthodes (osmotique et phase vapeur) pour les échantillons d'Argiles vertes de Romainville de l'Est et de l'Ouest. On remarque que :

- la zone de raccordement entre les points obtenus par la méthode osmotique et la méthode des pressions de vapeur saturante présente un net fléchissement dans le cas de E-AVR-0, qui peut être relié à l'incertitude de l'humidité relative imposée par les solutions salines au delà de 94 % comme il a été dit dans le paragraphe 2.2.3. Ce phénomène n'est pas observé sur le graphe de l'Argile verte de l'Ouest car le premier palier de succion imposé en phase vapeur est plus fort.

- La pente de la courbe de drainage augmente fortement à partir d'environ 6,2 MPa pour l'argile de l'Ouest, montrant ainsi qu'une importante partie des transferts hydriques est faite en phase vapeur.

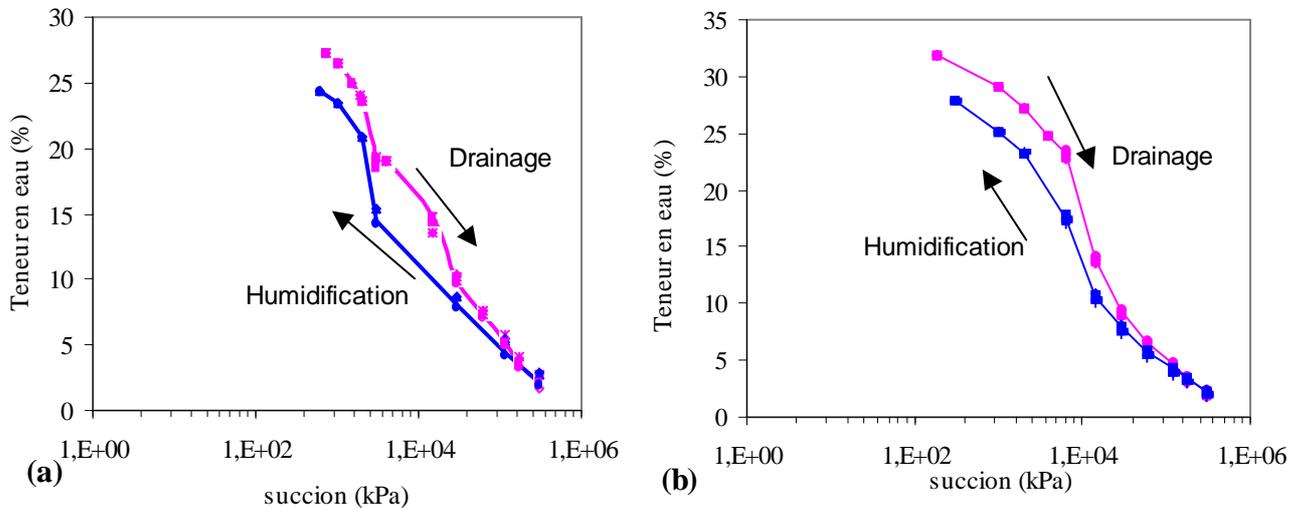


Figure 2.3.3 : Courbes de rétention de l'Argile verte de Romainville prélevée à l'Est de Paris (E-AVR-0), carrière de Villeparisis-Le Pin (a) et à l'Ouest de Paris (W-AVR-0), carrière de Corneilles-en-Parisis (b)

- La diminution de la succion de 305,5 MPa à 2 MPa est reliée à une augmentation très forte de la teneur en eau quelque soient les échantillons (de 2 à 23% pour E-AVR-0 et de 2 à 26% pour W-AVR-0). Ce comportement confirme que les phénomènes physicochimiques dans la rétention d'eau, par adsorption sur la surface des particules argileuses, sont prépondérants par rapport aux phénomènes capillaires.
- Un phénomène d'hystérésis qui augmente lorsque la succion diminue. Cependant, ce phénomène tend à diminuer pour les paliers en phase osmotique pour lesquels les transferts se font en phase liquide.

Une comparaison entre les courbes de rétention des Argiles vertes de l'Est et de l'Ouest montre une différence très marquée pour les succions inférieures à 14,6 MPa (Figure 2.3.4). Par contre, les deux courbes se rapprochent et tendent à converger pour des succions supérieures à 14,6 MPa. Ceci s'explique par le fait qu'au début de l'essai de drainage, la teneur en eau de l'Argile verte de l'Ouest est plus élevée et ainsi présente un poids volumique sec plus faible. Cette différence à la fois de teneur en eau et de densité sèche entraîne une différence sur les courbes de rétention du sol, particulièrement aux faibles succions (Loiseau, 2001 ; Vanapalli et al. 1999). Ainsi l'Argile verte de l'Ouest retient beaucoup d'eau aux faibles succions mais elle montre un taux de désorption très fort pour des succions supérieures au point d'entrée d'air.

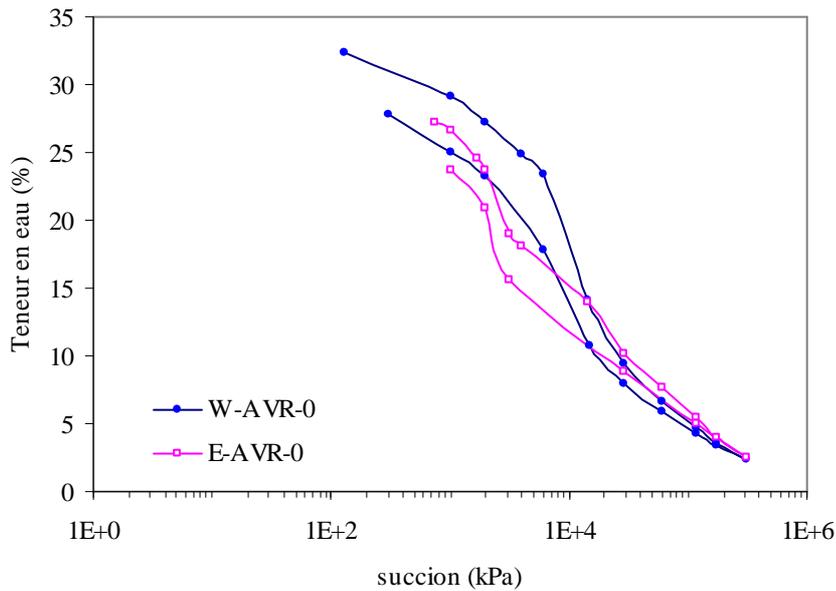


Figure 2.3.4 : Courbes de rétention des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'est et à l'ouest de Paris

2.3.3 Variation de l'indice des vides et du degré de saturation

L'application d'une succion à un échantillon de sol se traduisant simultanément par une variation de volume et une variation de teneur en eau, ou encore d'indice des vides et de degré de saturation, une représentation globale de l'état du matériau incluant tous ces paramètres est donnée sur la Figure 2.3.5 (E-AVR-0) et sur la Figure 2.3.6 (W-AVR-0) pour les paliers de succion où une mesure du volume de l'échantillon a été réalisée.

Sur le graphe représentant l'indice des vides en fonction de la succion ($e-s$) (Figure 2.3.5b et Figure 2.3.6b), on observe une variation importante d'indice des vides pour les succions inférieures à 15 MPa environ. Puis, lorsque les succions atteignent des valeurs supérieures, cette variation est moins importante et tend à s'annuler. Pour les matériaux des deux sites, on note une forte irréversibilité entre le drainage et l'humidification avant 15 MPa, et une quasi réversibilité au-dessus. Si on met, en parallèle avec le graphe précédent, le graphe représentant l'indice des vides en fonction de la teneur en eau ($e-w$ %) (Figure 2.3.5a, Figure 2.3.6a), on note des variations identiques et un palier qui traduit une stabilisation du volume à partir d'une teneur en eau de 15 % pour l'Argile verte de l'Est et de 19 % pour l'Argile verte de l'Ouest. En effet, l'indice des vides correspondant à une mesure du volume global de l'échantillon, les courbes ($e-w$ %) traduisent donc le retrait du sol. Dans le domaine saturé la variation de volume d'eau contenu dans l'échantillon est égale à la variation de volume du sol, ceci est représenté par une droite dans le diagramme ($e-w$ %). L'intersection de cette droite avec l'asymptote horizontale de la courbe quand la teneur en eau tend vers 0 correspond à la limite de retrait du sol. Ces deux graphes nous permettent de déterminer la limite de retrait w_{Re} % = 14,5 %, $e = 0,45$ (pour E-AVR-0) et w_{Re} % = 19 %, $e = 0,57$ (pour W-AVR-0) correspondant respectivement à une succion d'environ 13 MPa et 14,6 MPa.

Une comparaison entre ces courbes de retrait et les courbes de retrait obtenues de façon classique, par mesure du volume des échantillons lors du séchage à l'air libre est donnée sur la Figure 2.3.7. On note des valeurs de la limite de retrait très voisines, avec un indice des vides plus faible dans le cas de séchage par phase vapeur, en particulier pour les Argiles vertes de l'Est.

Les deux graphes du milieu de la Figure 2.3.5 et de la Figure 2.3.6 montrent les variations du degré de saturation en fonction de la teneur en eau et de la succion. Les deux courbes présentent deux parties sensiblement linéaires correspondant pour l'une à un degré de saturation proche de 1 et pour l'autre à une désaturation rapide du sol due à une très faible variation de l'indice des vides.

L'intersection entre les deux droites caractérise le point d'entrée d'air, auquel correspond la succion de désaturation.

Cette construction nous permet donc de déterminer le point d'entrée d'air des sols étudiés, qui est très mal défini sur les courbes teneur en eau–succion ou indice des vides–succion dans le cas des Argiles vertes de l'Est. Les Argiles vertes de Romainville prélevées dans la carrière de l'est montrent un point d'entrée d'air vers 7 MPa et 6,2 MPa pour celles de la carrière de l'ouest.

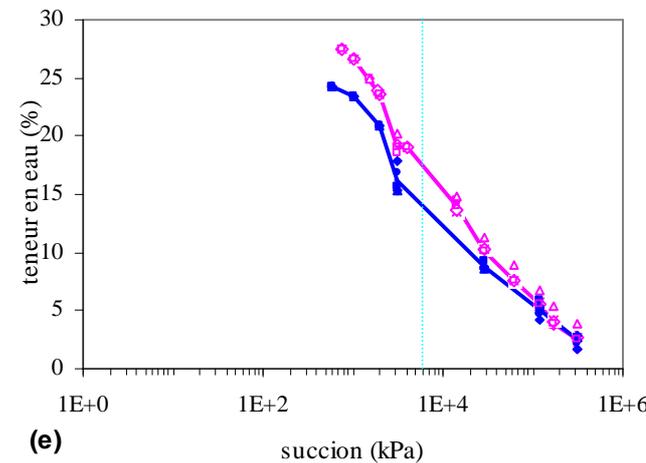
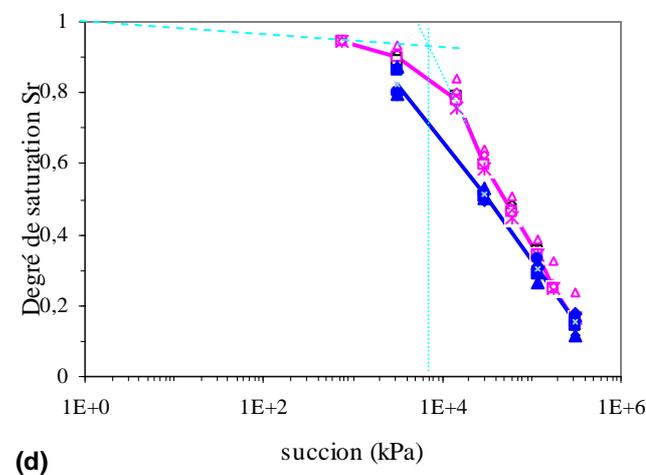
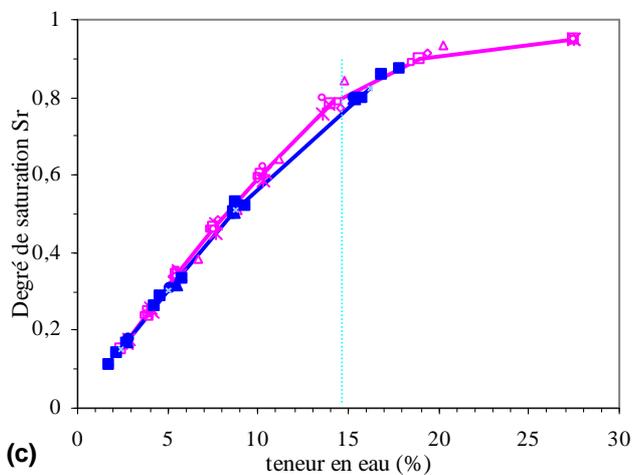
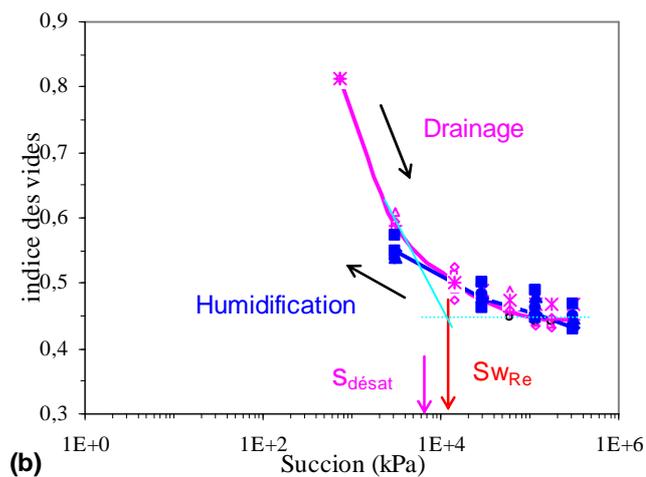
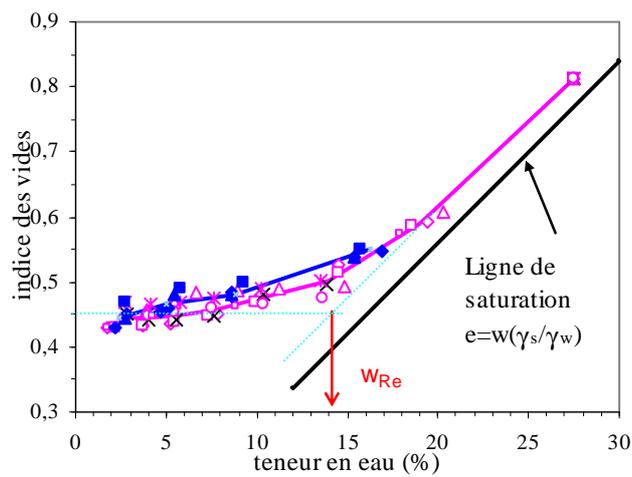


Figure 2.3.5 : Comportement global des Argiles vertes de Romainville de l'Est au cours d'un cycle de drainage-humidification, (w_{Re} = limite de retrait effective, Sw_{Re} = suction à la limite de retrait effective)

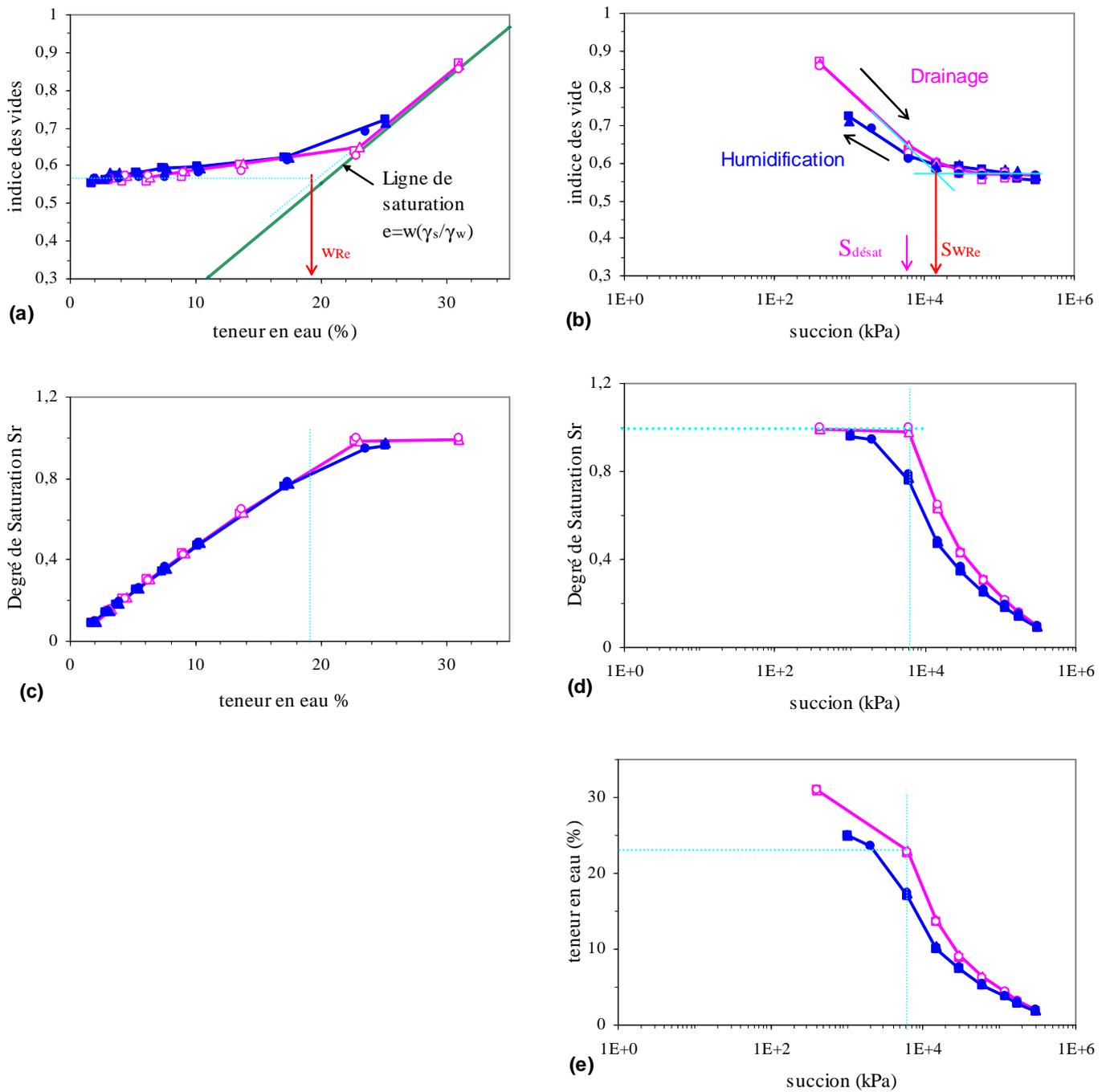


Figure 2.3.6 : Comportement global des Argiles vertes de Romainville de l'Ouest au cours d'un cycle de drainage-humidification, (w_{Re} = limite de retrait effective, s_{wRe} = succion à la limite de retrait effective)

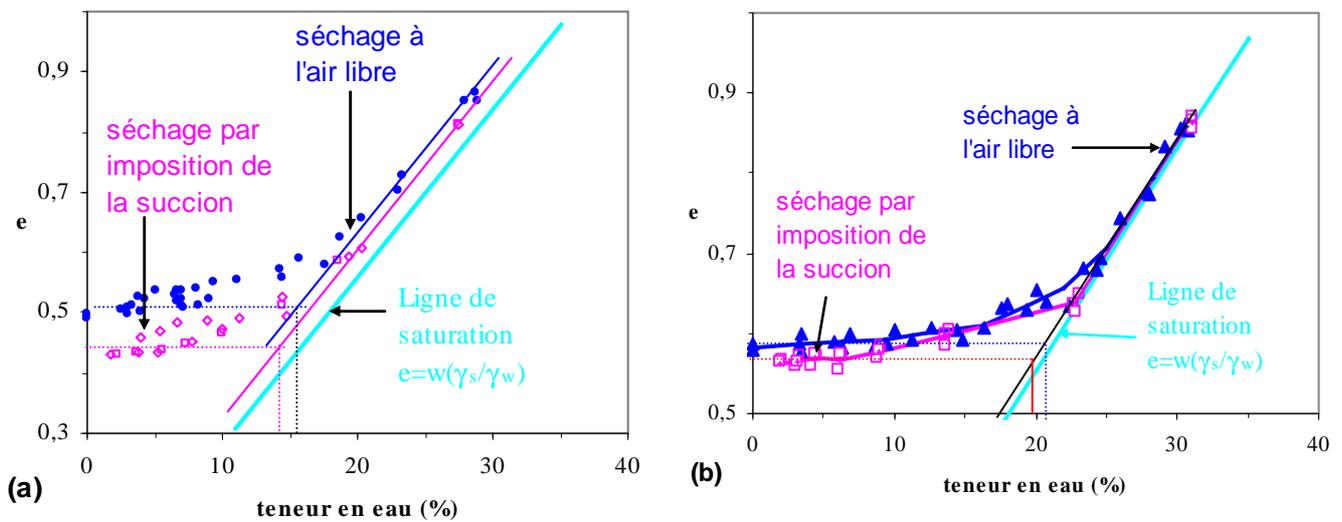


Figure 2.3.7 : Comparaison entre la limite de retrait déterminée par mesure de volume lors du séchage à l'air libre et par imposition des paliers de succion (a) pour des Argiles vertes de l'Est et b) pour les Argiles vertes de l'Ouest

2.3.4 Le rôle de la succion sur le squelette solide et sur la phase eau

Une représentation sur un même graphe de la courbe « indice des vides-suction » ($e-s$) et de la courbe « rétention d'eau-suction » sous la forme « indice d'eau » ($V_w/V_s = w\rho_s$) (Romero et Vaunat, 2000) (Figure 2.3.8), permet de comprendre le rôle joué par la succion sur l'édifice microstructural et sur la phase eau. La variation de l'indice des vides (e) met en évidence l'effet de la succion sur la microstructure du matériau, et la variation de l'indice d'eau ($w\rho_s$), l'effet de la succion sur la phase eau. Pour les sols étudiés, une comparaison entre la courbe ($e-s$) et la courbe ($w\rho_s-s$) montre que la phase eau est plus sensible aux variations de succion que le squelette. Autrement dit, qu'une augmentation de la succion entraîne des modifications plus importantes sur la phase eau que sur l'arrangement microstructural au-delà de 15 MPa.

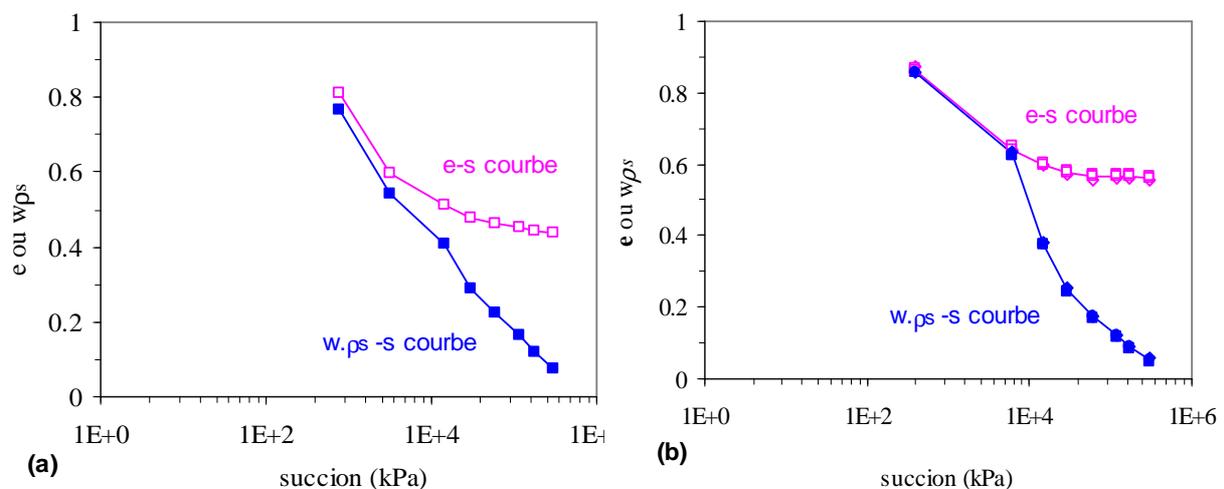


Figure 2.3.8 : Comparaison entre l'effet de variation de la succion sur le squelette du sol et sur la phase d'eau (a) pour des Argiles vertes de l'Est et b) pour les Argiles vertes de l'Ouest

2.4 Courbe de rétention des Marnes bleues d'Argenteuil de la carrière Villeparisis-Le Pin

La courbe de rétention du matériau a été déterminée en imposant des succions de 1 à 4 MPa par la méthode osmotique et de 3,1 MPa à 305,5 MPa par la méthode des solutions salines selon les protocoles d'essais exposés précédemment.

Les échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil ont suivi un cycle séchage-humidification en partant de l'état naturel ($w = 38 \%$, $s = 120 \text{ kPa}$).

Le chemin complet, séchage-humidification, suivi par les échantillons est le suivant (succion en MPa) :

3,1 → 14,6 → 29,5 → 60,4 → 118,2 → 173,5 → 305,5 → 118,2 → 29,5 → 3,1

Les résultats présentés sur la Figure 2.4.1 montrent l'évolution de la teneur en eau en fonction de la succion pour trois échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil de l'est. Ces courbes sont identiques pour les trois échantillons, montrant ainsi une bonne homogénéité du matériau et une répétitivité des résultats. Les deux méthodes d'imposition de la succion indiquent une bonne corrélation entre les différentes valeurs obtenues. On observe une quasi réversibilité entre le drainage et l'humidification pour les succions supérieures à 100 MPa ; en dessous de cette valeur les chemins de drainage et d'imbibition se séparent présentant ainsi un phénomène d'hystérésis.

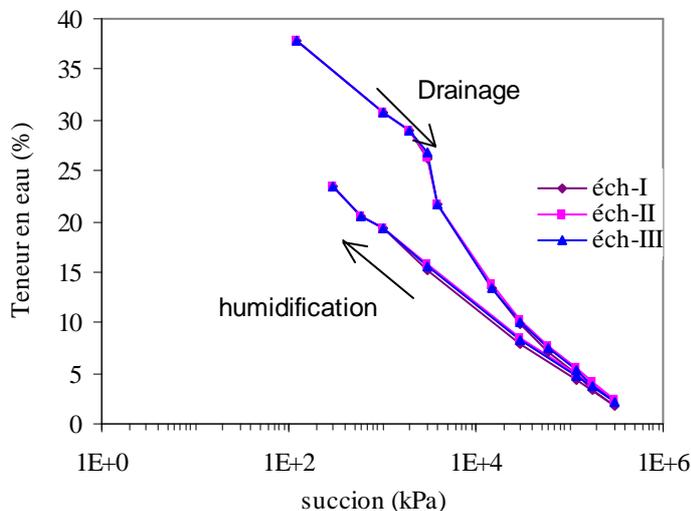


Figure 2.4.1 : Courbe de rétention des Marnes bleues d'Argenteuil prélevées à l'est de Paris (E-MBA-1), carrière de Villeparisis-Le Pin

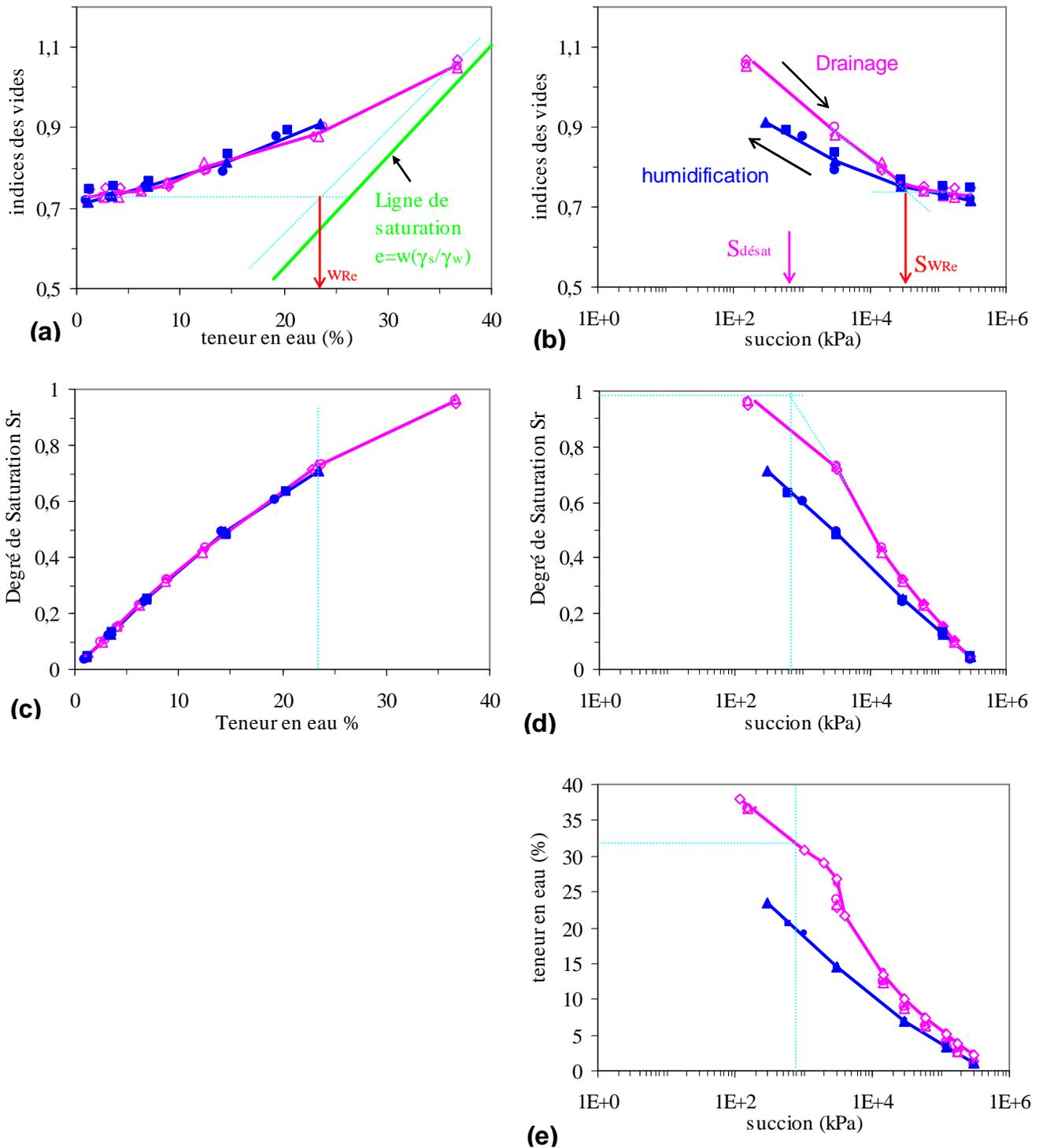


Figure 2.4.2 : Comportement global des Marnes bleues d'Argenteuil de l'est au cours d'un cycle séchage –humidification, (w_{Re} = limite de retrait effective, S_{wRe} = succion à la limite de retrait effective)

La Figure 2.4.2 présente le comportement global des Marnes bleues d'Argenteuil au cours d'un cycle séchage-humidification. La Figure 2.4.2a présente l'évolution de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau du matériau (courbe de retrait). On note que la limite de retrait du matériau correspond à une teneur en eau d'environ 23 % pour une succion de 30 MPa, et un indice des vides égal à 0,73. Au-dessus de la limite de retrait, la courbe e-w s'éloigne de la

courbe de saturation indiquant ainsi que la variation de volume du sol n'est pas proportionnelle à la quantité d'eau extraite. Le départ de l'eau se produit sans provoquer de retrait équivalent. Sur le graphe indice des vides-succion, un phénomène d'hystérésis est observé correspondant à un phénomène de retrait-gonflement provoqué par le cycle de séchage-humidification. Au-delà de 30 MPa de succion, valeur correspondant à la limite de retrait, ce phénomène d'hystérésis disparaît (Figure 2.4.2). Le même phénomène a été observé pour les Argiles vertes de Romainville. Dans ce domaine de succion élevée, l'eau est adsorbée par les particules argileuses, et le processus de séchage-humidification est réversible. Les Figure 2.4.2d et Figure 2.4.2e permettent d'estimer les valeurs de succion et de teneur en eau du point d'entrée d'air respectivement à 0,7 MPa et 32 %. Ces résultats sont très différents de ceux obtenus pour la limite de retrait ($s = 30 \text{ MPa}$, $w_{Re} = 23 \%$). La désaturation des Marnes bleues d'Argenteuil s'amorce très tôt en phase de drainage, se poursuit de façon progressive jusqu'à la limite de retrait et s'accroît au-delà de cette limite, lorsque l'indice des vides tend à se stabiliser (Figure 2.4.3). Ce phénomène qui n'a pas été observé pour les Argiles vertes de Romainville dénote une différence de comportement entre les deux matériaux. Alors que l'Argile verte de Romainville présente un comportement de sol plastique, les Marnes bleues d'Argenteuil intactes se comportent comme un sol très raide, voire même comme une roche tendre. Ce comportement est la conséquence de la présence d'un squelette semi-rigide constitué par les carbonates (cf. chapitre 5).

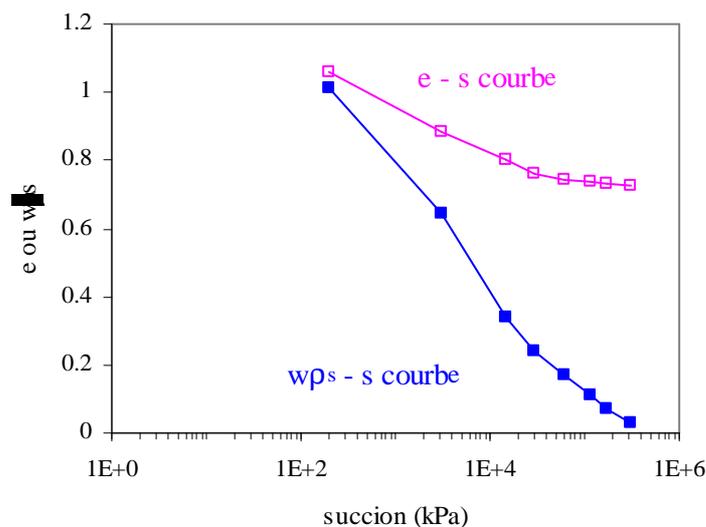


Figure 2.4.3 : Comparaison entre l'effet de variation de la succion sur le squelette solide et sur la phase eau pour des Marnes bleues de l'Est, carrière Villeparisis-Le Pin

2.5 Courbe de rétention des Argiles vertes remaniées

Les courbes de rétention pour les Argiles vertes remaniées (colluvions E-AVR-C) et pour un échantillon reconstitué au laboratoire, sont présentées sur la Figure 2.5.1. Les échantillons de colluvions de la carrière Villeparisis-Le Pin ont une masse volumique sèche initiale de $15,0 \text{ kN.m}^{-3}$. La teneur en eau initiale est de l'ordre de 29 % et la succion initiale de 300 kPa. A partir de cet état initial, les échantillons ont subi un cycle de séchage-humidification. La succion a été imposée par la technique en phase vapeur et par la méthode osmotique. Une gamme de succion comprise entre 0,6 et 305,5 MPa a été appliquée aux échantillons. A chaque palier la teneur en eau a été déterminée. La fragilité du squelette de sol n'a pas permis

une mesure du volume. Les 5 graphes (Figure 2.5.2) représentant le comportement global ont été tracés à partir de la courbe de rétention et de la courbe de retrait du sol obtenue de façon classique, par mesure de volume lors du séchage d'échantillons à l'air libre.

Le chemin séchage-humidification suivi par les échantillons est le suivant (succion en MPa) :

6,2 → 14,6 → 29,5 → 60,4 → 118,2 → 173,5 → 305,5 → 173,5 → 118,2 → 60,4 → 29,5 → 6,2

Les échantillons d'Argiles vertes de l'est reconstitués au laboratoire sont préparés à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité, puis déshydratés à l'air libre jusqu'à une teneur en eau équivalente à la teneur en eau naturelle du sol intact ($w = 27\%$, masse volumique sèche = $15,6 \text{ kN.m}^{-3}$). La succion initiale du sol est de l'ordre de 1,4 MPa (succion plus grande que l'échantillon naturel ayant la même teneur en eau). Par la suite, le chemin de séchage jusqu'à 305,5 MPa a été imposé par la technique de contrôle par phase vapeur.

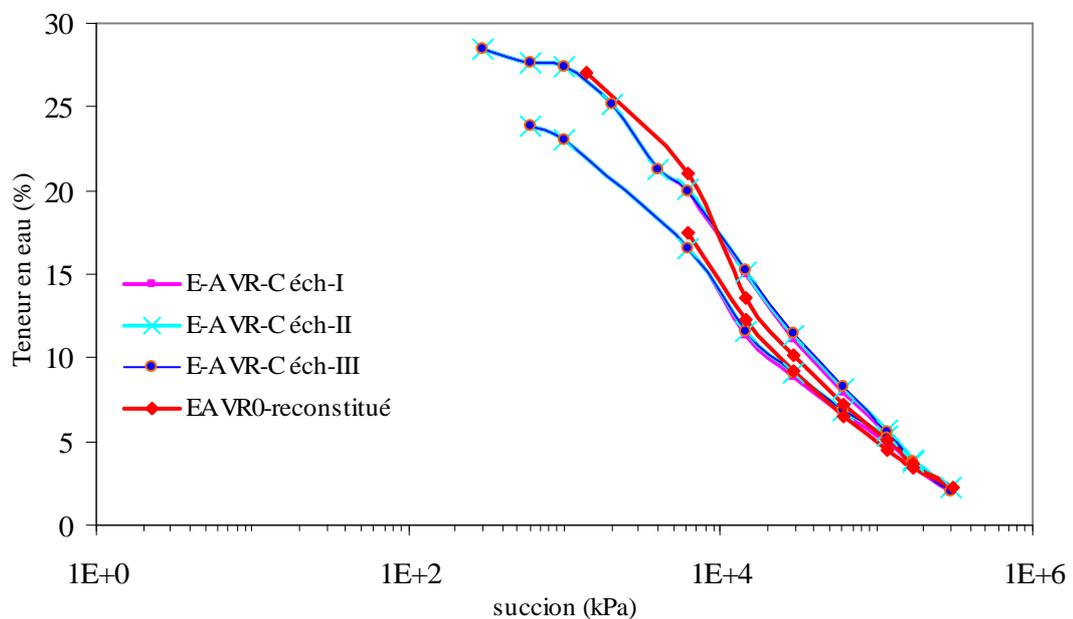


Figure 2.5.1 : Courbes de rétentions pour E-AVR-C et E-AVR-0 reconstitué

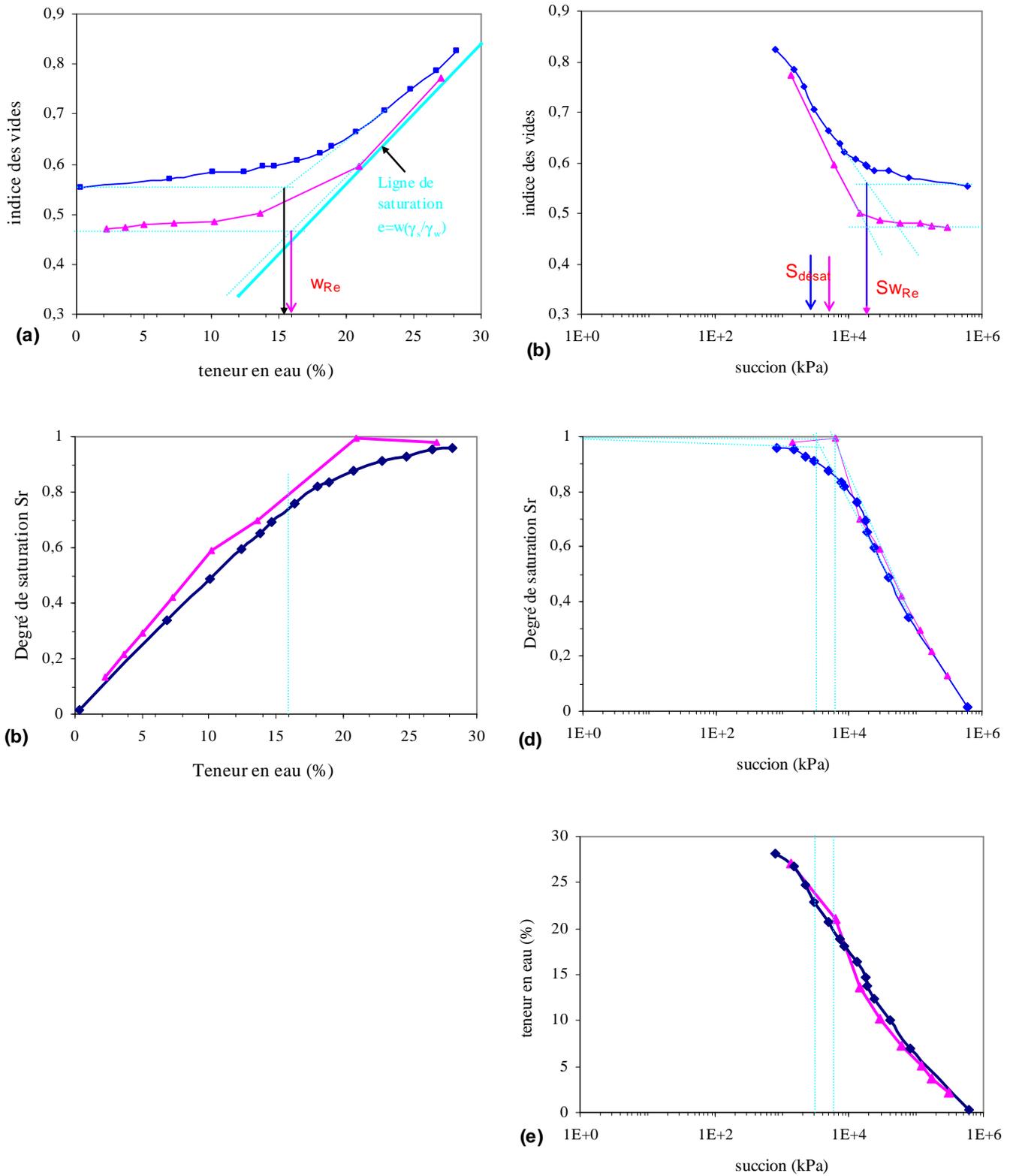


Figure 2.5.2 : Comportement global des Argiles vertes remaniées (colluvions et sol reconstitué) de l'Est au cours d'un cycle de séchage ; w_{Re} : limite de retrait effective, SW_{Re} : succion à la limite de retrait effective)

La Figure 2.5.1 et les graphes représentés sur la Figure 2.5.2 ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- les courbes des colluvions (E-AVR-C) sont identiques pour les trois échantillons, montrant ainsi une certaine homogénéité du matériau et une répétitivité des résultats.
- les courbes des deux sols, montrent une hystérésis entre drainage et humidification pour les suctions inférieure à 100 MPa. Au-delà de cette valeur de succion les courbes convergent.
- Les indices des vides continuent à diminuer pour les teneurs en eau inférieures à celle de la limite de retrait. Un indice des vides plus faible pour le sol reconstitué est enregistré montrant ainsi l'influence du remaniement sur le comportement du sol lors de séchage.
- la limite de retrait pour le deux sols est de l'ordre de 14 %, ce qui correspond à une succion de 20 MPa.
- Les colluvions ont un point d'entrée d'air (début de la désaturation) pour une succion de 3 MPa alors que pour le sol reconstitué le point d'entrée d'air se situe vers 6,2 kPa. À partir de ces valeurs, la désaturation est assez brutale.

Une comparaison entre les courbes de rétention obtenues sur les Argiles vertes intactes et remaniées est donnée en Figure 2.5.3. On note que les courbes de rétention convergent quand la succion imposée augmente. En admettant que ces sols ont une minéralogie très proche voire identique, si l'essai est répétitif pour des échantillons présentant la même teneur en eau initiale, par contre pour une différence de teneur en eau et de poids volumique un décalage vertical des courbes est observé qui s'affaiblit quand la succion imposée augmente. Ce décalage met en évidence que le comportement hydromécanique est sensible aux variations des conditions initiales des matériaux testés.

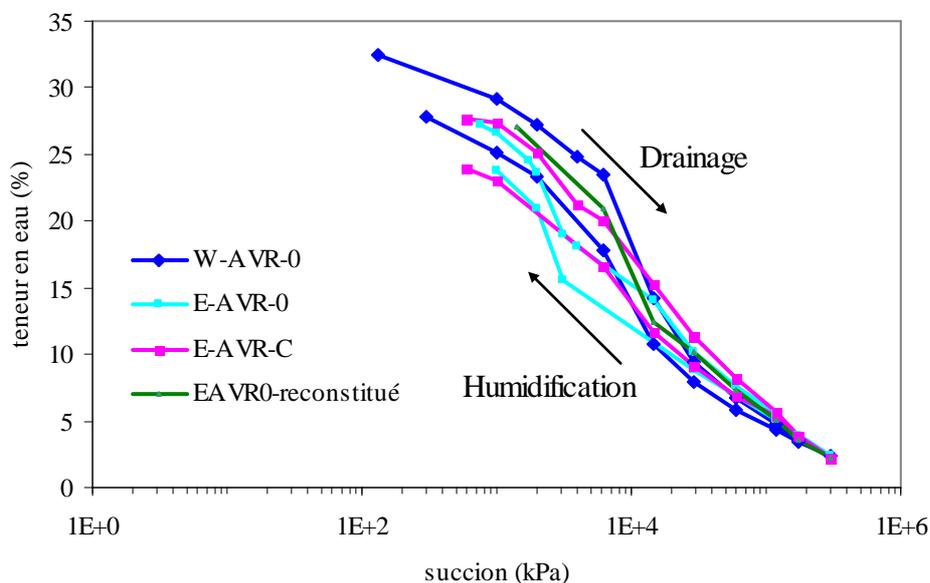


Figure 2.5.3 : Comparaison des courbes de rétentions d'échantillons d'Argiles vertes de Romainville présentant des conditions initiales différentes

2.6 Paramètres de van Genuchten

Pour les sols gonflants, les lois empiriques de prédiction de la courbe de rétention d'eau sont proposées par plusieurs auteurs : Burdine (1953), Mualem (1973), van Genuchten (1980), Fredlund et al. (1994) parmi d'autres. Le modèle proposé par van Genuchten (1980) est actuellement le plus utilisé :

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} ; \text{ avec } m = \left\{ 1 - \frac{1}{n} \right\}$$

Où ψ est la succion (en cm d'eau), θ est la teneur en eau volumique, θ_s est la teneur en eau de saturation, θ_r est la teneur en eau volumique résiduelle, α , n , m sont les paramètres de calage de la courbe de rétention.

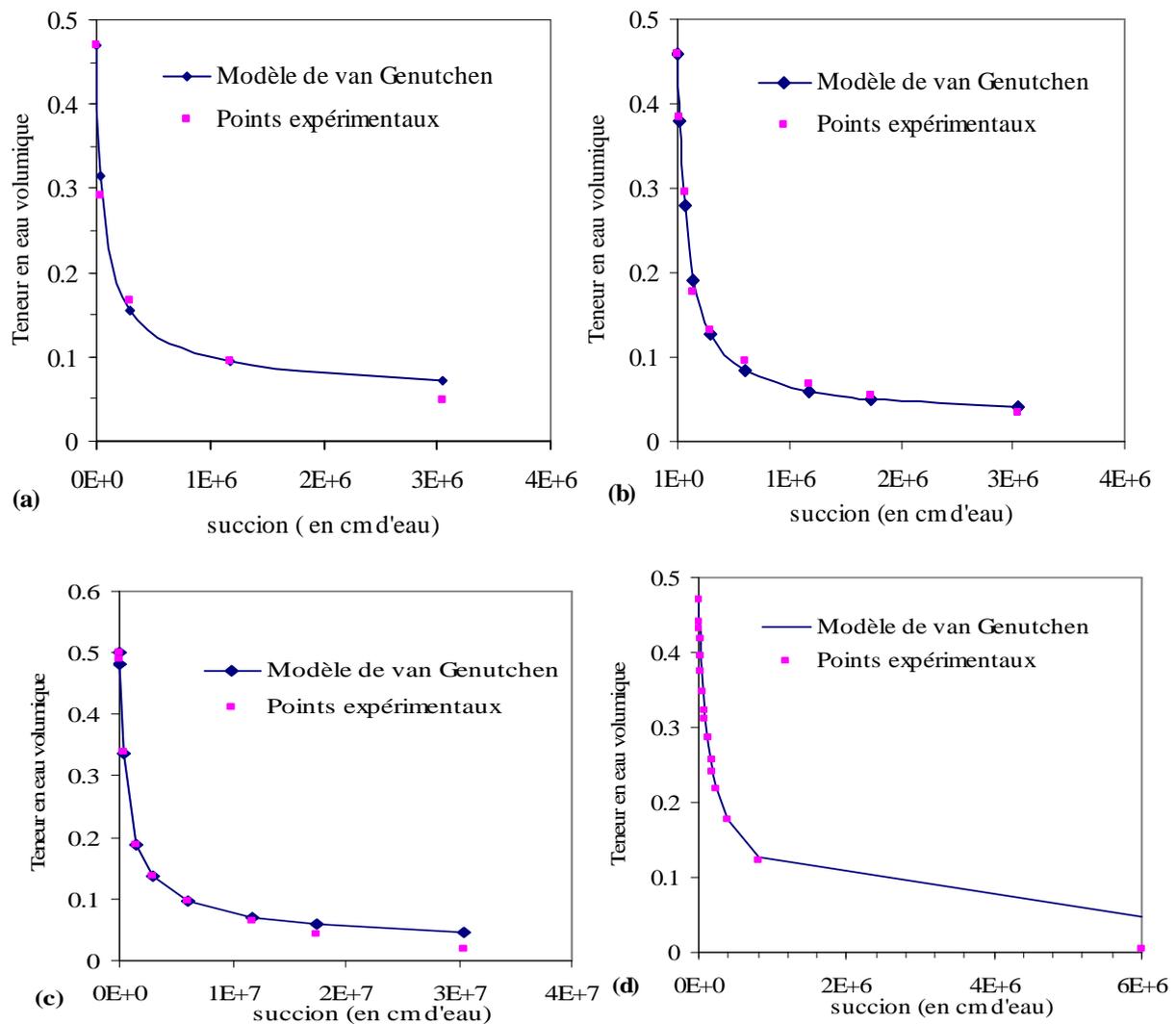


Figure 2.6.1 : Courbes de rétention de sols étudiés : (a) E-AVR-0 ; (b) W-AVR-0 ; (c) E-MBA-1 ; (d) E-AVR-C

Les courbes de rétention lors du séchage et de l'humidification présentées sur la Figure 2.6.1 sont simulées par cette méthode. Le Tableau 2.6.1 présente les différents paramètres de cette méthode pour chaque matériau étudié.

Tableau 2.6.1 : Paramètres des matériaux étudiés selon le modèle de van Genuchten

Matériaux étudiés	Chemins	θ_s	θ_r	n	$\alpha (10^{-3} \text{cm}^{-1})$
E-AVR-0	Séchage	0,47	0,02	1,250	0,01660
	Humidification	0,47	0,02	1,425	0,05530
W-AVR-0	Séchage	0,46	0,03	2,300	0,00495
	Humidification	0,46	0,03	2,000	0,01155
E-MBA-1	Séchage	0,50	0,01	1,562	0,00345
	Humidification	0,50	0,01	1,350	0,53000
E-AVR-C	Séchage	0,47	0,005	1,550	0,01275

2.7 Conclusion

Ce chapitre regroupe l'ensemble des essais expérimentaux réalisés sur les échantillons des deux formations pour étudier leur comportement hydrique.

L'analyse des courbes de rétention et des graphes du comportement global permet de décrire le comportement hydromécanique global des sols étudiés et de déterminer ainsi la pression d'entrée d'air, la limite de retrait et les succions correspondantes pour chaque matériau.

Les chemins de drainage et d'humidification sont quasi réversibles pour des succions supérieures à 100 MPa et présentent un phénomène d'hystérésis pour des succions plus faibles. Dans le domaine des succions au delà de 100MPa, l'eau est adsorbée par les particules argileuses, et le processus de séchage/humidification est réversible.

L'analyse des courbes montre l'influence des conditions initiales (teneur en eau et poids volumique sec initiaux) sur le comportement hydromécanique du sol.

Le point d'entrée d'air et la limite de retrait de MBA sont très éloignés l'un de l'autre en comparaison avec ceux de AVR. La désaturation des Marnes bleues d'Argenteuil s'amorce très tôt en phase de drainage, se poursuit de façon progressive jusqu'à la limite de retrait et s'accroît au-delà de cette limite, lorsque l'indice des vides tend à se stabiliser. Cette différence peut être attribuée au fort pourcentage de carbonates dans MBA, qui constitue un squelette semi-rigide s'opposant en partie au retrait et qui lui confère un comportement de sol induré, alors que AVR a un comportement de sol plastique.

Les courbes de rétention sont calées de manière satisfaisante ($r^2 \geq 0,99$) au modèle de Van Genuchten (1980). Les paramètres de van Genuchten obtenus par simulation peuvent être intégrés dans un modèle numérique.

Chapitre 3 Analyse de Gonflement des matériaux étudiés

3.1 Introduction

Les essais de laboratoire constituent des outils privilégiés pour mesurer les variations de volume dus au retrait-gonflement des sols. Afin d'apprécier l'aptitude à ce phénomène, des mesures de paramètres expérimentaux ont été réalisées.

Ce chapitre présente les résultats obtenus au cours de la campagne d'essais de laboratoire effectués dans le cadre de cette thèse. Une première partie est consacrée à la présentation des protocoles d'essais. Puis suivent les résultats d'essais de gonflement libre au cours desquels les différences de comportement des sols (Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil), testés à l'état naturel et à l'état remanié, sont analysées. Enfin, sont présentés les résultats d'essai de gonflement, obtenus au moyen de deux procédures particulières : les essais de gonflement par la méthode de gonflement libre suivi d'une consolidation et par la méthode du volume constant. Les deux procédures fournissent les paramètres caractérisant la pression de gonflement.

3.2 Protocoles d'essai

Les essais de gonflement sont menés dans des moules œdométriques conventionnels (Figure 3.2.1a) et dans un moule cylindrique de type œdométrique en plexiglas (Figure 3.2.1b) selon la procédure ASTM, 1997.

Les échantillons cylindriques, de diamètre 70 mm et de hauteur comprise entre 12,0 et 24,3 mm, sont taillés et les extrémités sont dressées de façon à obtenir des surfaces planes parallèles et perpendiculaires à l'axe de l'échantillon.

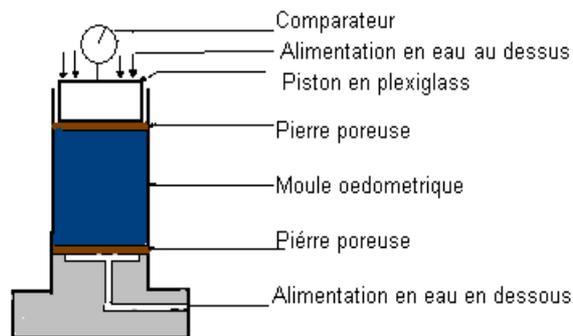
Une fois l'échantillon taillé, il est introduit dans le moule huilé sur sa surface intérieure. Des pierres poreuses sèches et des papiers filtres sont placés dans le moule au-dessus et en dessous de l'échantillon, le comparateur est mis en place sur le piston. L'échantillon est alimenté en eau par le haut et le bas du moule.

L'évolution du gonflement unidimensionnel est mesurée à l'aide de capteurs de déplacement au 1/1000 de mm. Les mesures sont enregistrées électroniquement, à intervalles de temps croissants.

Des essais de gonflement libre et de mesure de pression de gonflement sont menés sur les sols étudiés. La pression de gonflement est déterminée soit par la méthode à gonflement libre et chargement progressif jusqu'au retour à la hauteur initiale (1^{ère} méthode), soit par la méthode à volume constant (2^{ème} méthode).



(a)



(b)

Figure 3.2.1 : (a) Essais oedométriques avec moules œdométriques conventionnels, (b) Moule de type œdométrique en plexiglas (Parcevaux, 1980)

Première méthode

Le protocole du gonflement libre est le suivant : après montage de l'éprouvette dans une cellule œdométrique, elle est soumise au processus d'imbibition sous une contrainte

correspondant au poids du piston variant entre 0,7 et 6,3 kPa. Les déformations verticales sont mesurées, la déformation maximale rapportée à la hauteur initiale correspond au potentiel de gonflement. Une fois la déformation du gonflement stabilisée, le chargement s'effectue de manière progressive, par paliers, selon un taux de chargement choisi. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale.

Deuxième méthode

Dans la méthode à volume constant (ASTM, D 4546-85, méthode C), l'éprouvette est soumise au processus d'imbibition tout en maintenant son volume constant. Pour ce faire, l'échantillon est soumis, avant humidification, à une pression verticale voisine des conditions in situ ou d'une pression de gonflement estimée. Les déformations verticales sont empêchées en augmentant progressivement la charge appliquée. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant est la pression de gonflement.

3.3 Résultats

3.3.1 Gonflement libre

Les essais ont été menés sur l'ensemble des matériaux intacts (EAVR-0, EAVR-1, EMBA-0, EMBA-01, EMBA-1, WAVR-0, WAVR-1, WMBA-0), sur les mêmes matériaux après remaniement au laboratoire (homogénéisés à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité et ramenés à la teneur en eau naturelle avant essai de gonflement) et sur les colluvions EAVR-C.

Le Tableau 3.3.1 et le Tableau 3.3.2 résument les états initiaux et les résultats obtenus lors des essais de gonflement libre. Les courbes de gonflement libre sont données sur la Figure 3.3.1 à la Figure 3.3.10. On observe des courbes de cinétique de gonflement classique : un gonflement primaire relativement rapide suivi d'un gonflement secondaire de faible amplitude devant le gonflement primaire. Il est donc acceptable de dire que l'essentiel du gonflement est réalisé à la fin du gonflement primaire. On remarque également une dispersion des résultats due aux variations des conditions initiales. Des échantillons prélevés côte à côte dans un même bloc peuvent présenter des conditions initiales différentes. Le contrôle de la teneur en eau initiale pour les argiles intacts et du poids volumique humide est très délicat.

Les mesures de gonflement se faisant sur des échantillons différents, la dispersion des résultats est en partie due à l'hétérogénéité, à l'échelle de l'échantillon, des matériaux étudiés.

Les Argiles vertes intacts montrent un fort gonflement par rapport aux Marnes bleues intacts bien que ces dernières contiennent un pourcentage de smectite plus élevé. Ceci peut être attribué à la présence d'un pourcentage important de carbonates, de 25 % à 64 % (contre 12 % à 20% pour les Argiles vertes), qui contrarie le gonflement.

Les Argiles vertes de l'Est supérieures et inférieures et les colluvions présentent un taux de gonflement très proche lorsqu'elles sont soumises au même poids du piston. En général leur taux de gonflement oscille entre 15 % et 27 %. Une légère décroissance du taux de gonflement est observée lorsque le poids du piston augmente. Les essais menés sur les Argiles vertes de l'Est remaniées montrent que le potentiel de gonflement est obtenu pour une teneur en eau initiale supérieure de la limite de plasticité (Tableau 3.3.1).

Deux échantillons d'Argiles vertes de Romainville de l'est dont la surface de base est perpendiculaire au plan du litage montrent des taux de gonflement similaires à ceux observés pour des échantillons dont la surface de base est parallèle au plan du litage mais présentent une cinétique de gonflement plus rapide (Figure 3.3.1). Cette différence de comportement résulte de l'anisotropie de perméabilité du matériau.

Les Argiles vertes de l'Ouest montrent un taux de gonflement plus faible (compris entre 3 % et 12 %) que celui des Argiles vertes de l'Est. Ceci peut s'expliquer par des valeurs de leurs teneurs en eau initiales plus élevées et par la proportion de smectite.

Le taux de gonflement des Marnes bleues intactes est le plus souvent inférieur à 2 % (sauf pour E-MBA-01 où il peut atteindre une dizaine de %). Cette valeur n'évolue pas malgré une large gamme de teneurs en eau initiales (23 % - 40 %) et un indice de plasticité supérieur à celui des Argiles vertes. Ceci peut être attribué à la présence d'un réseau de calcite très dense qui s'oppose au gonflement libre des argiles en créant une certaine rigidité de la microstructure (cf. chapitre 5).

A teneurs en eau voisines et pour un même poids du piston, les échantillons remaniés présentent des taux de gonflement bien plus grands à ceux des échantillons intacts :

- E-AVR-0 w%=27, $\Delta H/H_0$ intact =16 %, $\Delta H/H_0$ remanié =31 % ;
- E-MBA-1 w%=24, $\Delta H/H_0$ intact \leq 1 %, $\Delta H/H_0$ remanié =15 % ;
- E-MBA-01 w%=27, $\Delta H/H_0$ intact \leq 10 %, $\Delta H/H_0$ remanié =24 % ;
- E-MBA-0 w%=35, $\Delta H/H_0$ intact \leq 1 %, $\Delta H/H_0$ remanié =18 % ;
- W-AVR-1 w%=32, $\Delta H/H_0$ intact \leq 8 %, $\Delta H/H_0$ remanié =23 % ;
- W-MBA-0 w%=28, $\Delta H/H_0$ intact = 1 %, $\Delta H/H_0$ remanié =11 %.

Ces résultats témoignent de l'importance de la microstructure des sols, en particulier de la présence de liaison ou de cimentation qui jouent un rôle important dans l'amplitude des variations de volume observées au cours de gonflement. La rupture des liaisons entre les minéraux entraîne une déstructuration du sol qui facilite l'accès de l'eau aux argiles et ainsi leur permet d'exprimer pleinement leur aptitude au gonflement (cas du sol remanié). Le Roux (1972), Pejon et al. (1997), Bauer-Plaindoux et al. (1997), et Serratrice (2007) ont remarqué que la connaissance, seule, de la composition minéralogique des marnes, ne permet pas d'expliquer leur comportement en présence d'eau et que leur microstructure joue un rôle prépondérant au cours du gonflement.

Le taux de gonflement des sols remaniés, mesuré sous un même poids de piston, augmente avec une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau initiale (Figure 3.3.11). Pour les sols intacts, les résultats obtenus montrent que l'effet de différents paramètres d'états (teneur en eau et densité sèche initiales) sur le taux de gonflement varie fortement d'une argile à l'autre. Ainsi, le taux de gonflement des Argiles vertes intactes, mesuré sous un même poids de piston augmente légèrement avec une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau initiale (Figure 3.3.11). Par contre, pour les Marnes bleues, l'influence de paramètres physiques initiaux sur le taux de gonflement semble négligeable à l'exception d'EMBA-01 pour laquelle le taux de gonflement mesuré augmente avec une diminution de la densité sèche et une augmentation de la teneur en eau initiale (Figure 3.3.11).

Ces différences de comportement renforcent l'idée que la microstructure et la composition minéralogique, notamment la présence et le taux de carbonates, jouent un rôle prépondérant sur l'aptitude au gonflement de ces matériaux.

Tableau 3.3.1 : Résultats du gonflement libre de l'ensemble des échantillons pour différentes contraintes apportées par le piston (Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est : carrière de Villeparisis – Le Pin)

Echantillons	w _o (%)	H _o (mm)	γ _h (kN.m ⁻³)	γ _d (kN.m ⁻³)	e ₀	ΔH/H _o (%)	Contrainte apportée par le piston (kPa)	% CO ₃
E-AVR-0	22,0	24,0	19,9	15,9	0,75	17,5	6,3	
	27,8	12,0	19,0	14,7	0,90	15,8	6,3	
	23,0	12,0	20,1	16,3	0,72	21,7	6,3	
	24,3	12,0	20,0	16,0	0,74	14,2	6,3	
	23,6	12,0	19,6	15,7	0,78	13,6	6,3	
	24,9	20,0	19,7	15,8	0,76	18,8	2	
	28,0	18,0	19,2	15,0	0,86	16,2	2	
	26,0	20,0	20,1	15,9	0,75	15,5	2	
	22,7	20,0	20,0	16,3	0,71	22,8	2	
	23,8	20,0	20,2	16,3	0,71	23,0	2	
	25,4	24,3	19,8	15,8	0,76	26,4	0,7	
	25,0	23,0	19,7	15,7	0,76	26,0	0,7	
	E-AVR-0 (remanié)	27,3	19,8	19,5	15,3	0,82	32,0	2
27,6		19,8	19,5	15,3	0,82	31,0	2	
37,9		20,1	18,5	13,4	1,08	15,7	2	
43,4		20,1	18,1	12,6	1,22	12,0	2	
E-AVR-1	25,3	20,1	20,0	16,0	0,75	27,5	0,8	
	26,4	20,1	19,9	15,7	0,78	25,6	0,8	
	22,4	15,5	20,7	16,9	0,65	27,8	0,7	
	24,2	20,0	20,6	16,6	0,68	25,0	0,5	
	24,7	20,1	20,4	16,4	0,71	24,1	0,5	
	21,1	20,1	21,0	17,4	0,61	25,2	2	
	24,9	20,0	19,8	15,8	0,77	18,5	2	
E-AVR-C	25,9	20,1	20,0	15,9	0,76	19,0	2	
	21,8	20,0	20,4	16,7	0,67	24,0	2	
	28,1	20,1	19,7	15,4	0,85	19,0	0,5	
	29,1	20,1	19,4	15,0	0,83	22,0	0,5	
	27,9	20,1	19,7	15,4	0,82	13,1	2	
	27,8	20,0	19,8	15,5	0,81	14,8	2	
E-MBA-1	23,3	20,1	20,4	16,5	0,66	1,24	2	61
	23,7	20,1	20,4	16,5	0,67	0,84	2	60
	23,4	20,1	20,5	16,6	0,65	0,76	2	60
	23,4	20,1	20,4	16,6	0,66	1,21	2	60
	32,0	24,0	18,8	14,2	0,93	4,5	0,7	27
	27,6	12,0	19,2	15,0	0,83	1,2	6,3	34
	28,6	12,0	18,5	14,4	0,91	1,1	6,3	34

<i>E-MBA-1 (remanié)</i>	34,2	20,0	18,5	13,8	1,00	26,0	2	27
	23,9	20,0	20,2	16,3	0,69	15,0	2	56
E-MBA-01	23,8	19,9	20,3	16,4	0,71	3,8	2	55
	25,5	20,1	19,8	15,8	0,80	8,6	2	44
	27,0	20,1	19,7	15,5	0,84	10,0	2	44
	31,5	15,0	19,2	14,6	0,92	15,6	2	24
	31,8	15,0	19,7	14,9	0,87	15,6	2	23
	26,7	20,1	19,8	15,6	0,81	6,4	0,5	44
	23,9	20,0	20,0	16,1	0,74	6,3	0,5	54
	<i>E-MBA-01 (remanié)</i>	26,8	20,1	19,8	15,6	0,80	24,4	2
	32,8	20,1	18,9	14,2	0,97	16,9	2	46
E-MBA-0	37,0	20,1	18,3	13,4	1,03	2,5	0,8	64
	40,0	24,0	18,0	12,9	1,09	1,5	0,7	64
	37,3	20,1	18,4	13,4	1,02	2,4	2	64
	36,7	20,1	18,4	13,5	1,01	1,0	2	64
	37,3	20,0	18,5	13,5	1,01	1,8	0,5	64
	38,0	20,0	18,4	13,4	1,03	1,7	0,5	64
	<i>E-MBA-0 (remanié)</i>	32,9	20,1	18,6	14,0	0,93	20,0	2
	35,2	20,1	18,4	13,6	0,99	18,0	2	63
	30,3	20,0	18,6	14,3	0,90	24,0	2	63

Tableau 3.3.2 : Résultats du gonflement libre de l'ensemble des échantillons pour différentes contraintes apportées par le piston (Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest : carrière de Cormeilles-en-Parisis)

Echantillons	w _o (%)	H _o (mm)	γ _h (kN.m ⁻³)	γ _d (kN.m ⁻³)	e ₀	ΔH/H _o (%)	Contrainte apportée par le piston (kPa)
W-AVR-0	32,2	15,0	19,5	14,8	0,87	10,4	0,5
	32,0	15,0	19,5	14,8	0,87	9,0	0,5
	32,0	20,1	19,3	14,6	0,90	9,9	0,5
	32,0	20,0	19,3	14,6	0,90	8,6	0,5
	29,9	20,1	19,5	15,0	0,84	8,4	2
	29,8	19,8	19,6	15,1	0,83	10,4	2
<i>W-AVR-0 (remanié)</i>	28,0	20,1	19,6	15,3	0,80	18,4	2
	28,1	20,1	19,6	15,3	0,80	16	2
W-AVR-1	31,1	19,9	19,4	14,8	0,87	5,9	2
	31,6	19,9	19,2	14,6	0,9	7,8	2
	30,3	20,1	19,4	14,9	0,87	9,8	0,5
	30,6	20,0	19,5	15,0	0,87	12,3	0,5
	32,6	20,1	19,0	14,3	0,93	3,8	2
	32,5	20,1	19,3	14,5	0,90	3,5	2
<i>W-AVR-1(remanié)</i>	31,5	20,1	1,92	14,6	0,90	22,7	2
	26,9	20,0	1,98	15,6	0,78	29,7	2
	28,0	20,0	19,6	15,3	0,79	1,1	0,5

W-MBA-0	27,5	20,0	19,9	15,6	0,77	0,6	0,5
	27,9	19,9	19,4	15,2	0,81	1,1	2
	26,8	20,1	19,6	15,4	0,78	1,1	2
	25,6	20,1	20,0	15,9	0,73	1,4	2
	25,9	20,1	20,0	15,9	0,73	1,4	2
	26,4	20,1	19,9	15,7	0,75	1,0	2
W-MBA-0 (remanié)	31,4	20,1	19,2	14,6	0,88	9,1	2
	28,3	20,1	19,7	15,3	0,79	11,4	2

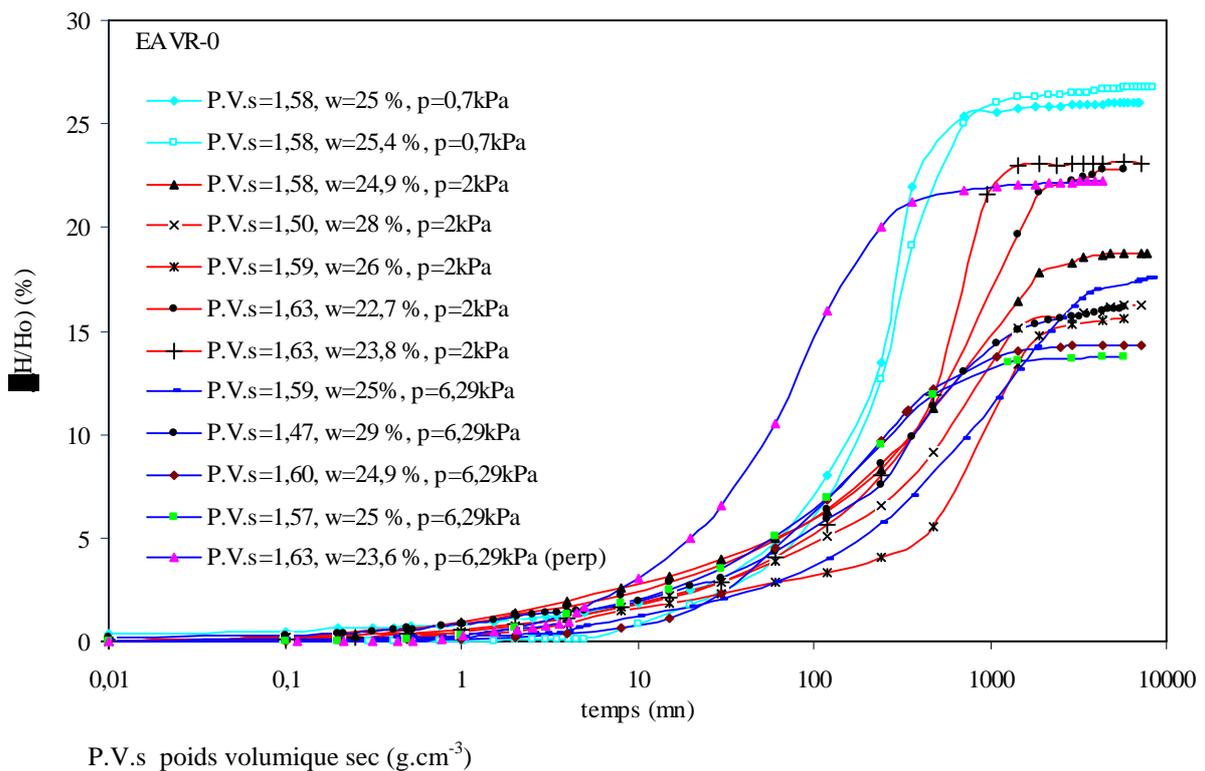


Figure 3.3.1: Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EAVR-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales

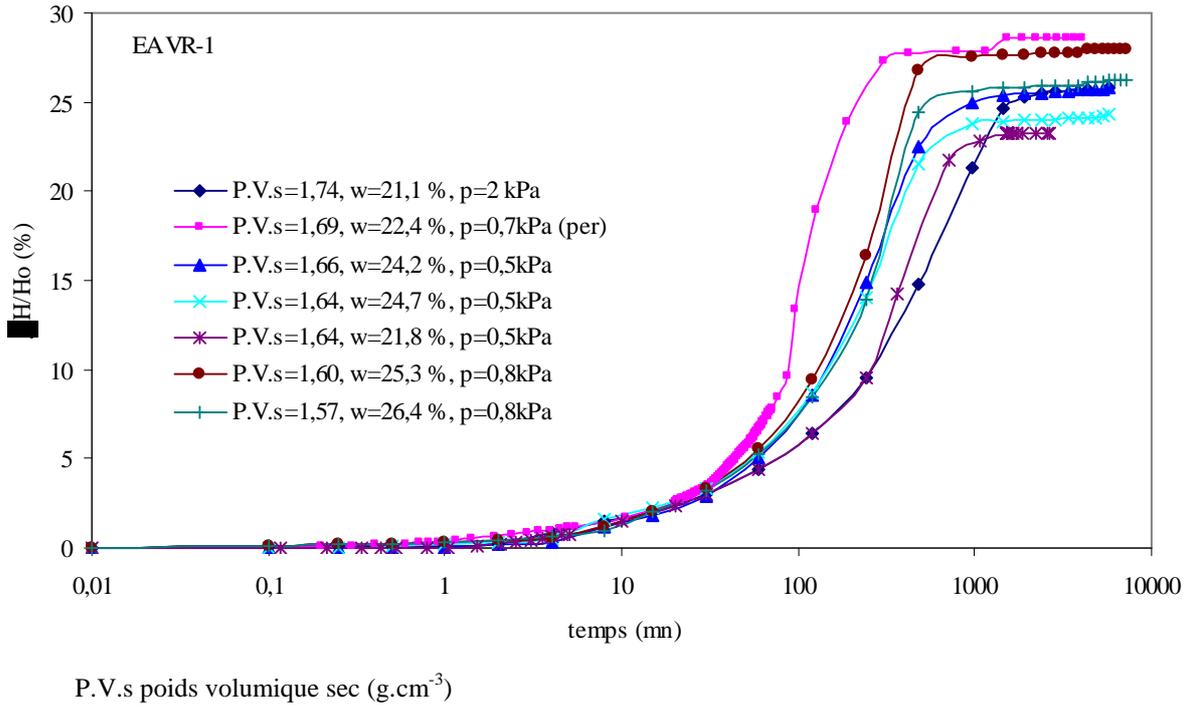


Figure 3.3.2 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EAVR-1 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales

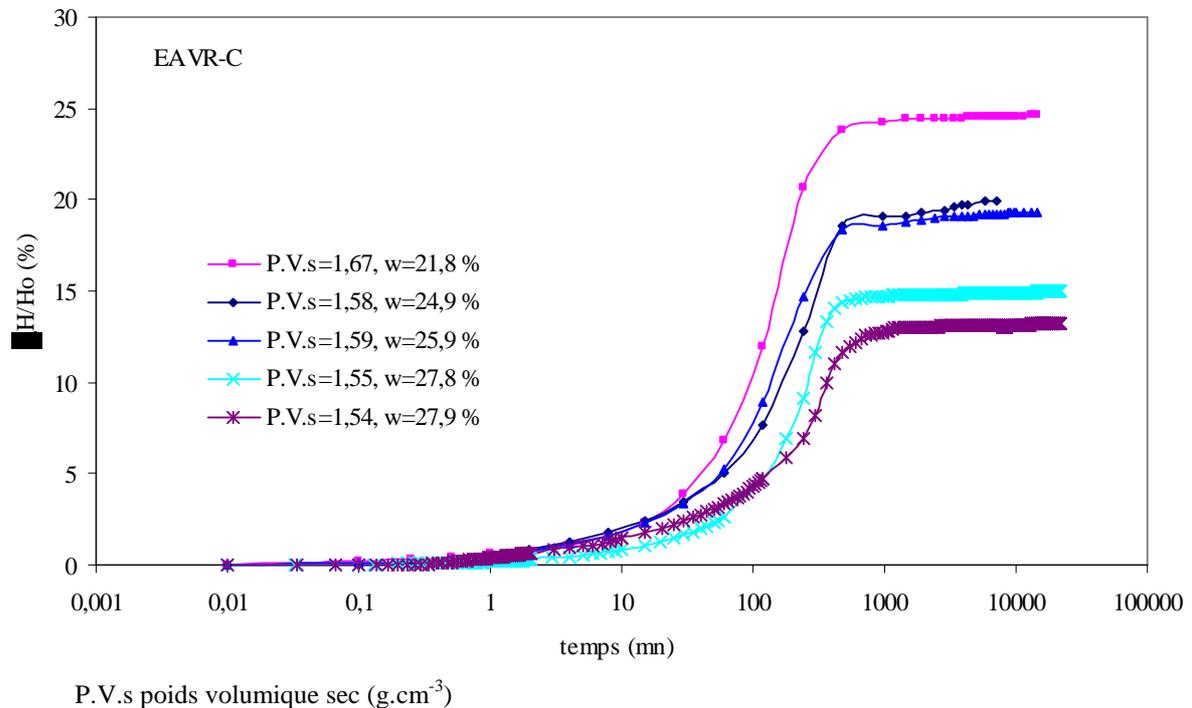


Figure 3.3.3 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EAVR-C testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales

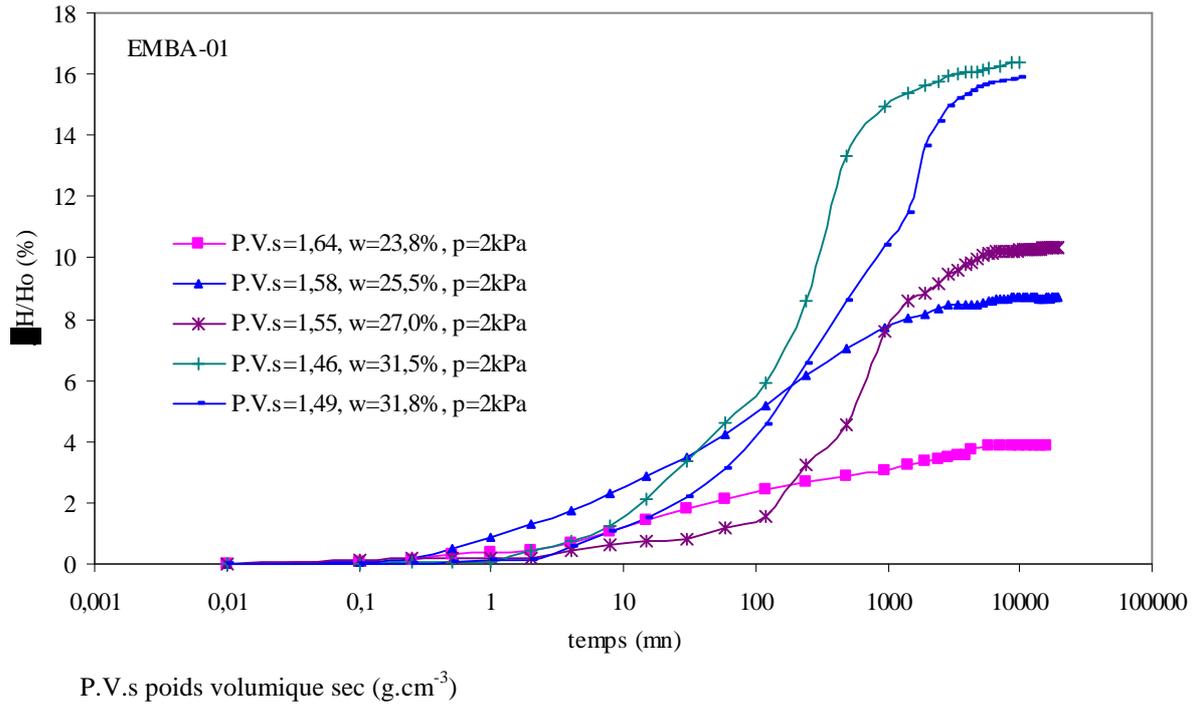


Figure 3.3.4 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EMBA-01 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales

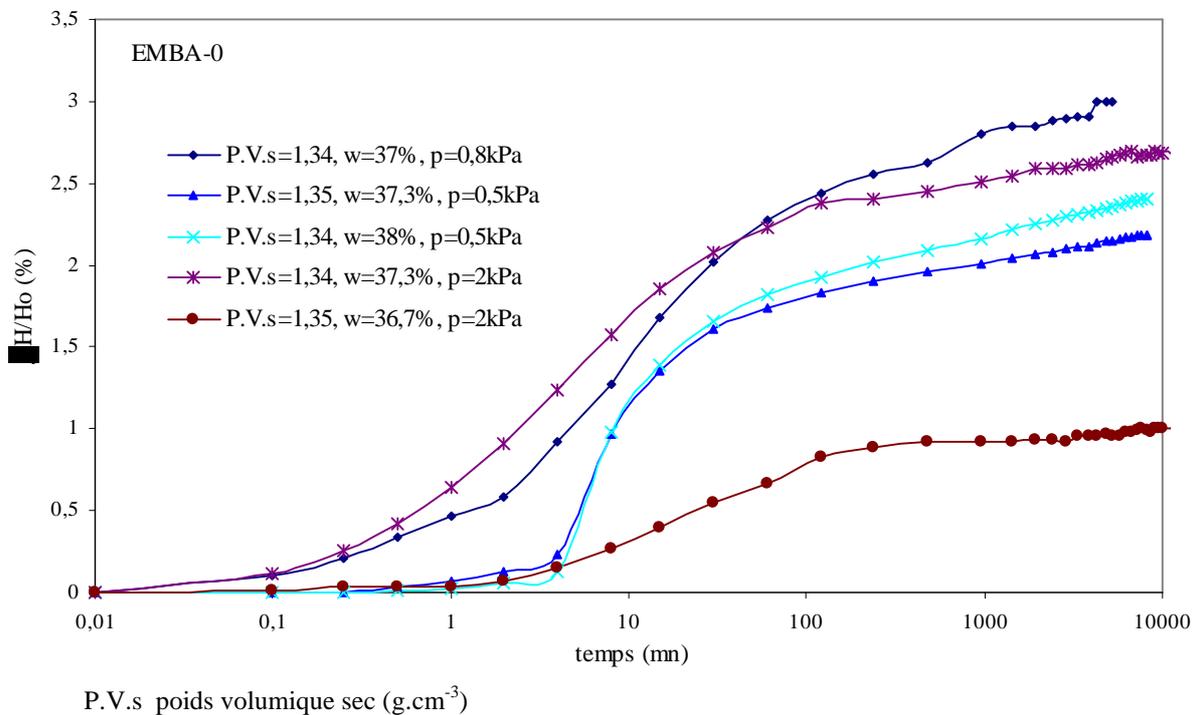


Figure 3.3.5 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons EMBA-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales

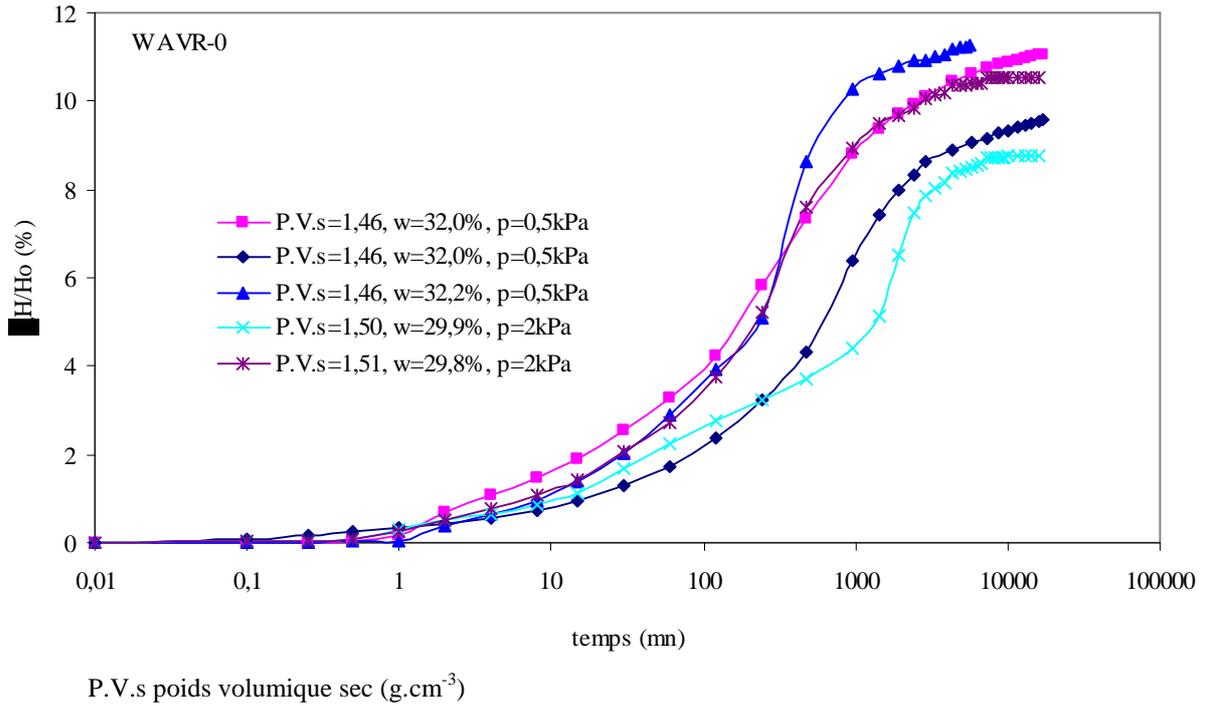


Figure 3.3.6 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons WAVR-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales

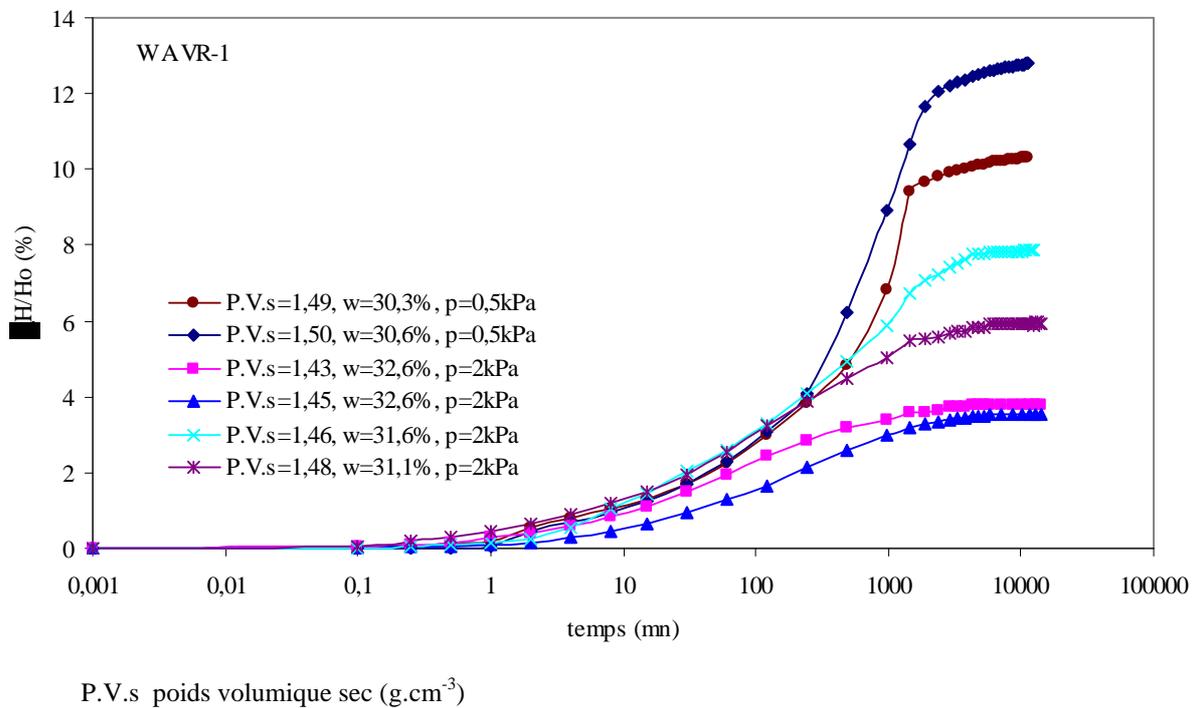
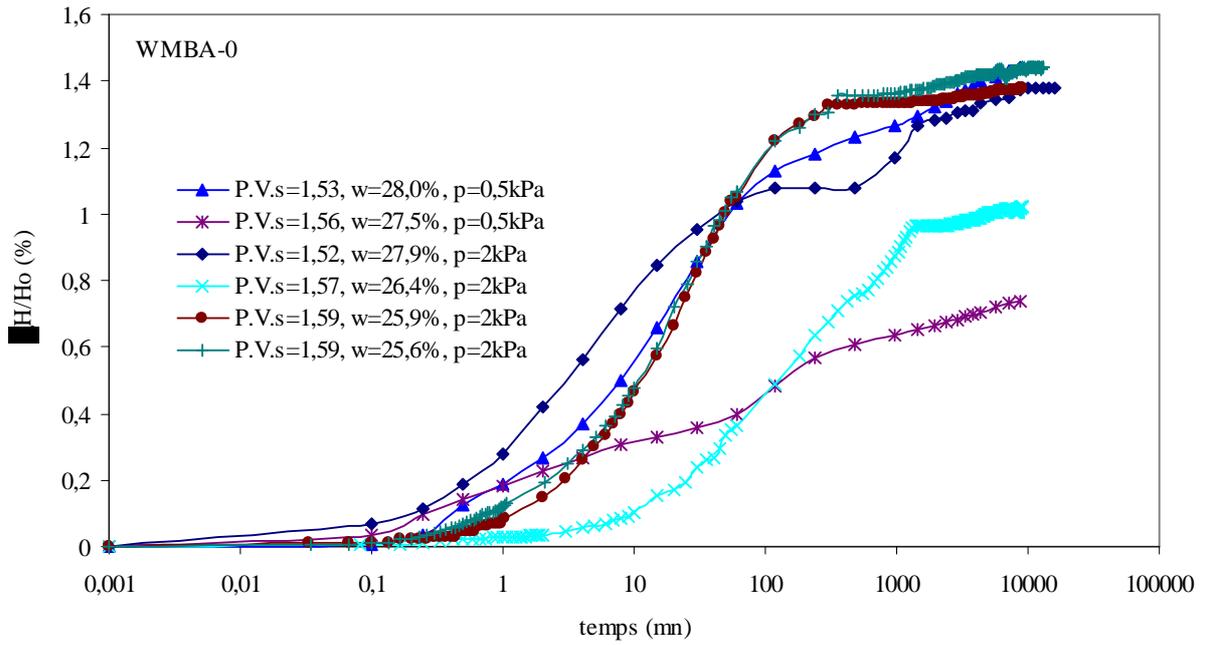
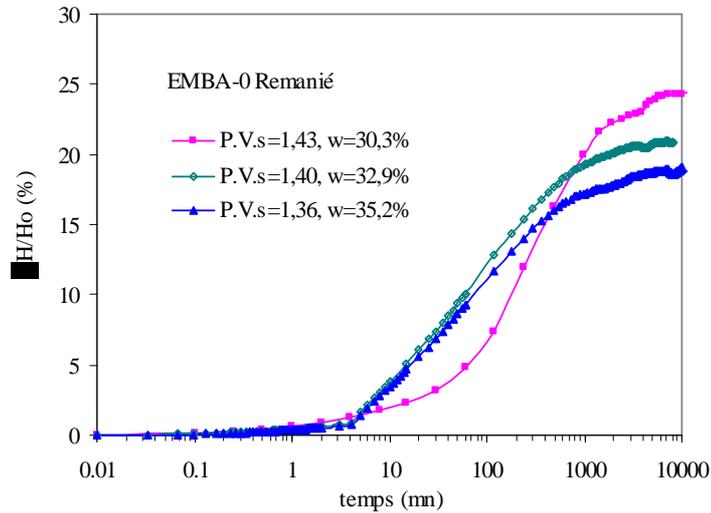
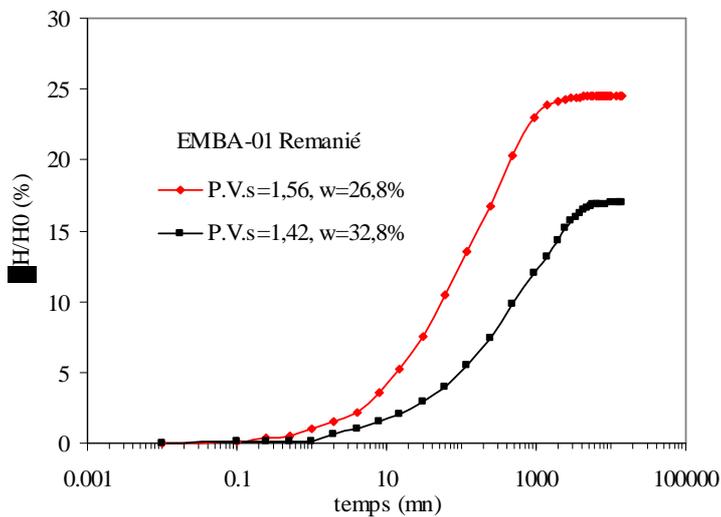
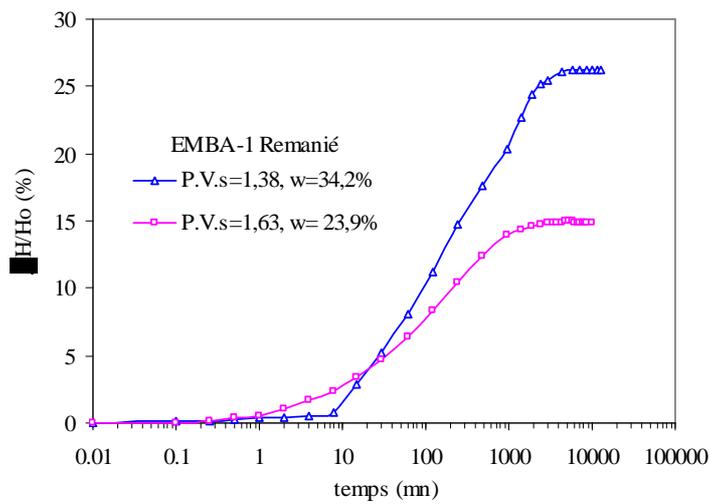
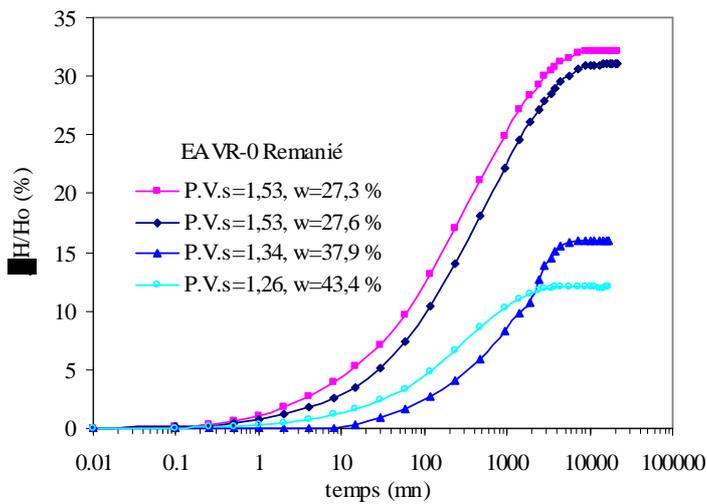


Figure 3.3.7 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons WAVR-1 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales



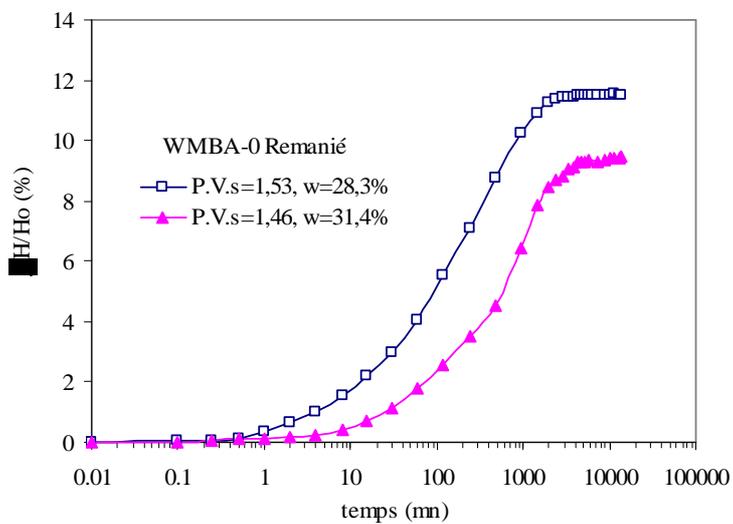
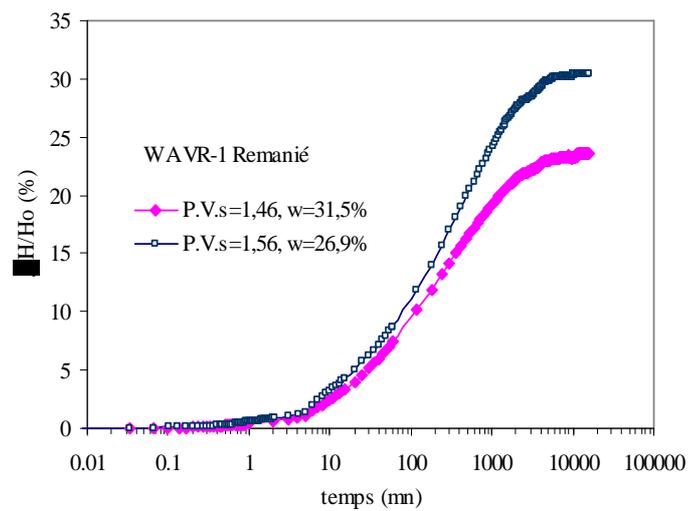
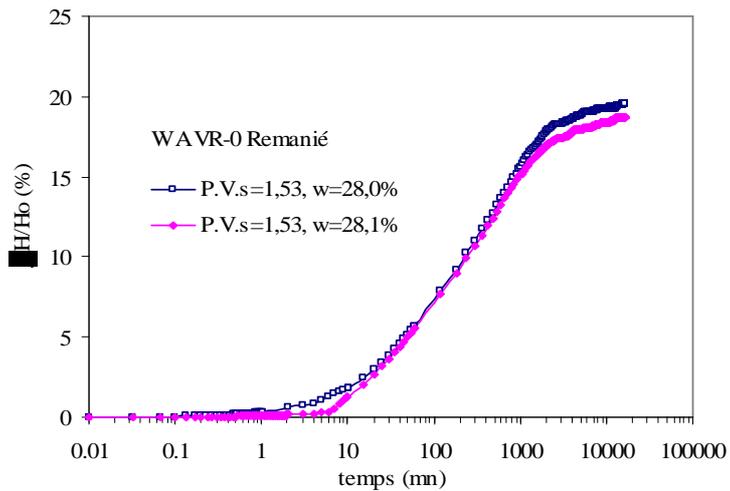
P.V.s poids volumique sec (g.cm⁻³)

Figure 3.3.8 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) des échantillons WMBA-0 testés à partir de leur état naturel, sous différentes charges verticales



P.V.s poids volumique sec (g.cm^{-3})

Figure 3.3.9 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) pour les Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil remaniées, étudiées : carrière de Villeparisis-Le Pin



P.V.s poids volumique sec (g.cm^{-3})

Figure 3.3.10 : Evolution des déformations verticales en fonction du temps (cinétique du gonflement) pour les Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil remaniées, étudiées : carrière de Corneilles-en-Parisis

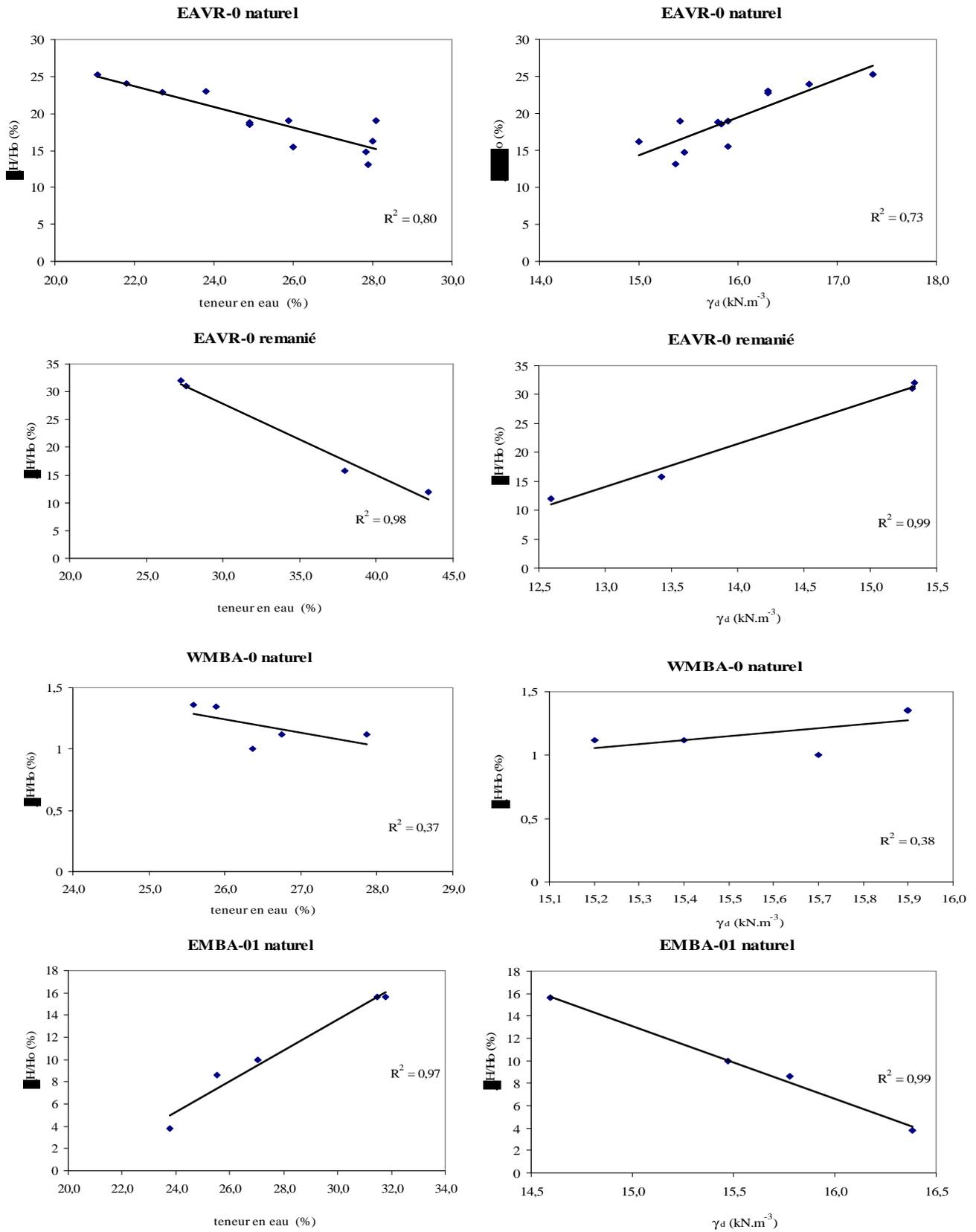


Figure 3.3.11 : Relation entre le gonflement maximal et la teneur en eau initiale (à gauche) et la densité sèche initiale (à droite) pour les différents échantillons testés sous une charge verticale $\sigma_v = 2 \text{ kPa}$

3.3.2 Modélisation du gonflement par une loi hyperbolique

Les résultats représentés sur la Figure 3.3.12 (relation $\Delta H/H_o$ vs $f(t)$), et sur la Figure 3.3.13 montrent bien que l'évolution du taux de gonflement vertical ($\Delta H/H_o$) en fonction du temps suit une loi hyperbolique et que les courbes expérimentales s'ajustent bien suivant la relation (Dakshanamurthy, 1978 ; Vayssade, 1978 ; Parcevaux, 1980) :

$$\frac{\Delta H}{H_o} = G \cdot \frac{t}{B+t}$$

G : le taux de gonflement final pour un temps infini

B : le temps de demi-gonflement

L'équation ci dessus est une droite dans le système de coordonnées ($t, t/[\Delta H/H_o]$) où G et B peuvent être déterminé graphiquement (Figure 3.3.13) :

$$t / \frac{\Delta H}{H_o} = \frac{1}{G} t + \frac{B}{G}$$

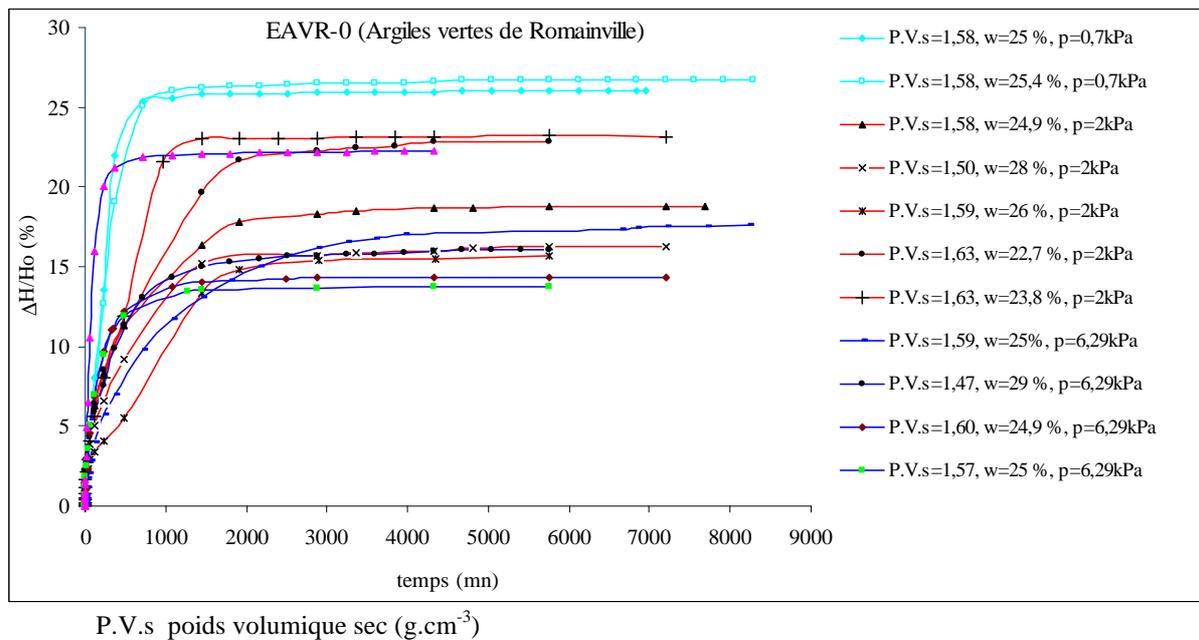
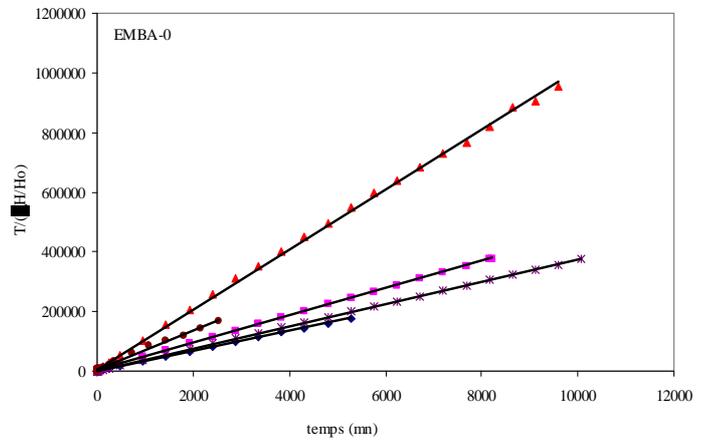
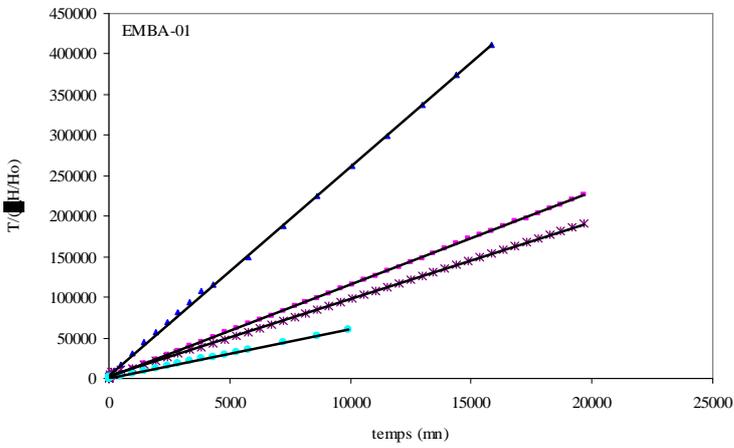
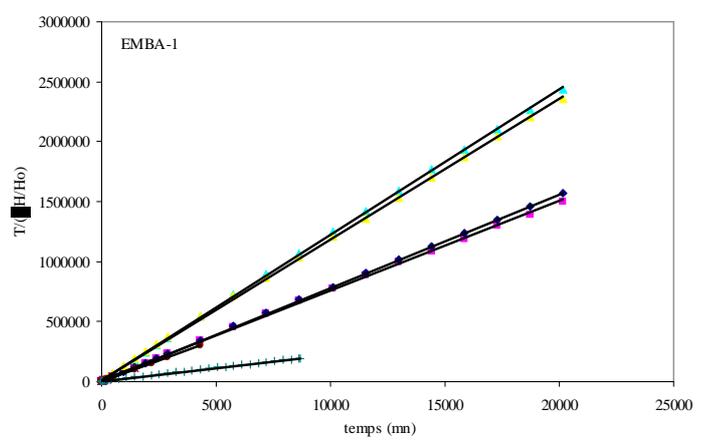
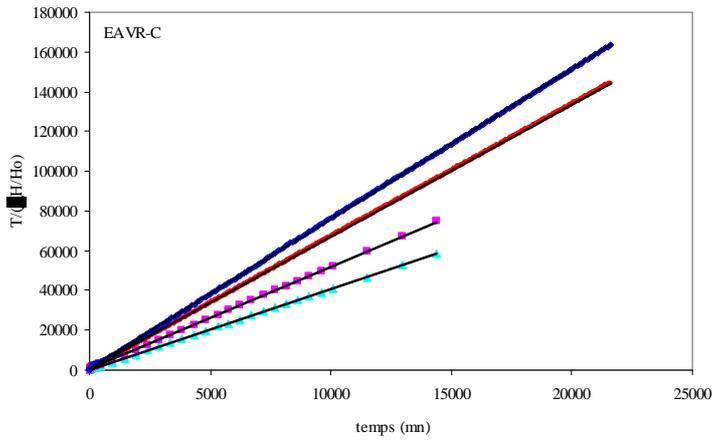
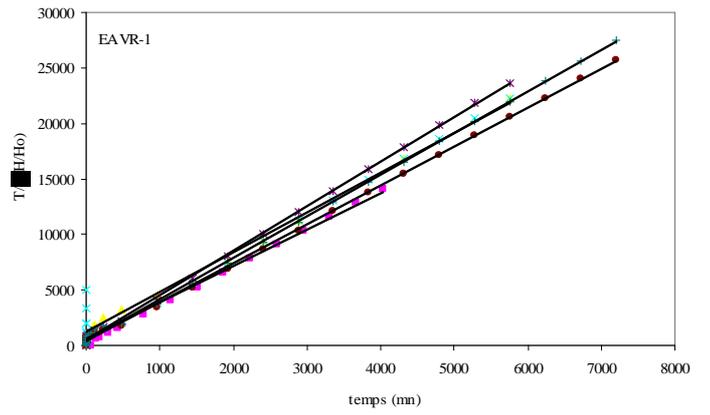
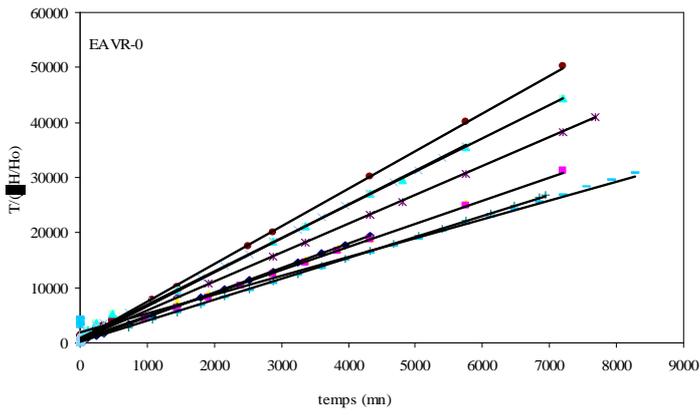
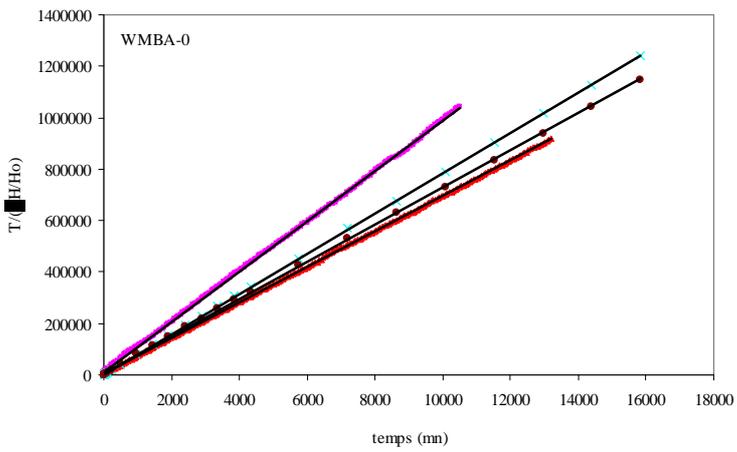
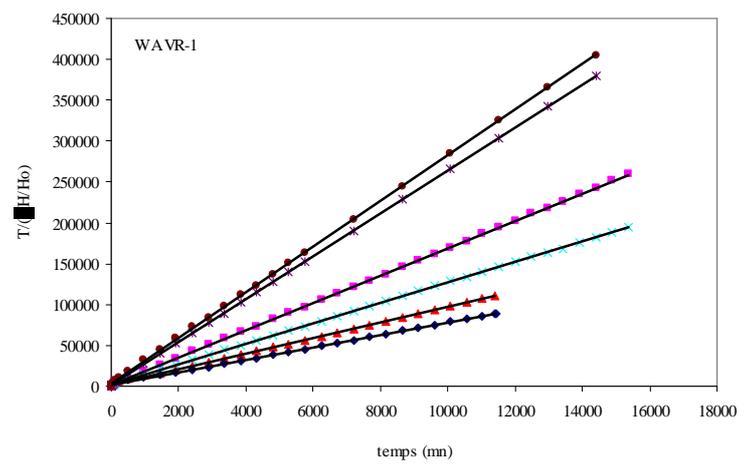
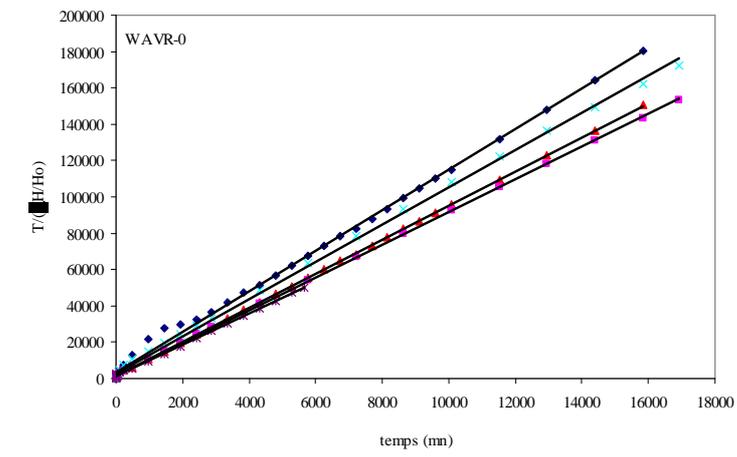


Figure 3.3.12 : Cinétique du gonflement $\Delta H/H_o$ en fonction du temps

Pour tous les essais effectués, en faisant abstraction des premières mesures, les relations $\Delta H/H_o = f(t)$, représentées dans le système de coordonnées ($t, t/[\Delta H/H_o]$) (Figure 3.3.13), montrent bien que le taux de gonflement en fonction du temps suit bien une loi hyperbolique. Le taux de gonflement final (G) déterminé graphiquement par la loi hyperbolique, est comparable ou égal au taux de gonflement final mesuré expérimentalement (Figure 3.3.14, Figure 3.3.15 et Figure 3.3.16). Par contre il existe une incompatibilité totale entre les mesures et le modèle pour le temps du demi-gonflement (Figure 3.3.14, Figure 3.3.15 et Figure 3.3.16). Selon Parcevaux (1980), cette incompatibilité est lié à la cinétique « anormale » au début d'essai dont l'influence est prépondérante sur le temps de demi-gonflement déterminé expérimentalement.



a) sols de l'est de Paris tests à l'état naturels



b) sols de l'Ouest de Paris tests à l'état naturels

Figure 3.3.13 : Cinétique du gonflement : Relation $t/(\Delta H/H_0)$ en fonction de t (mn)

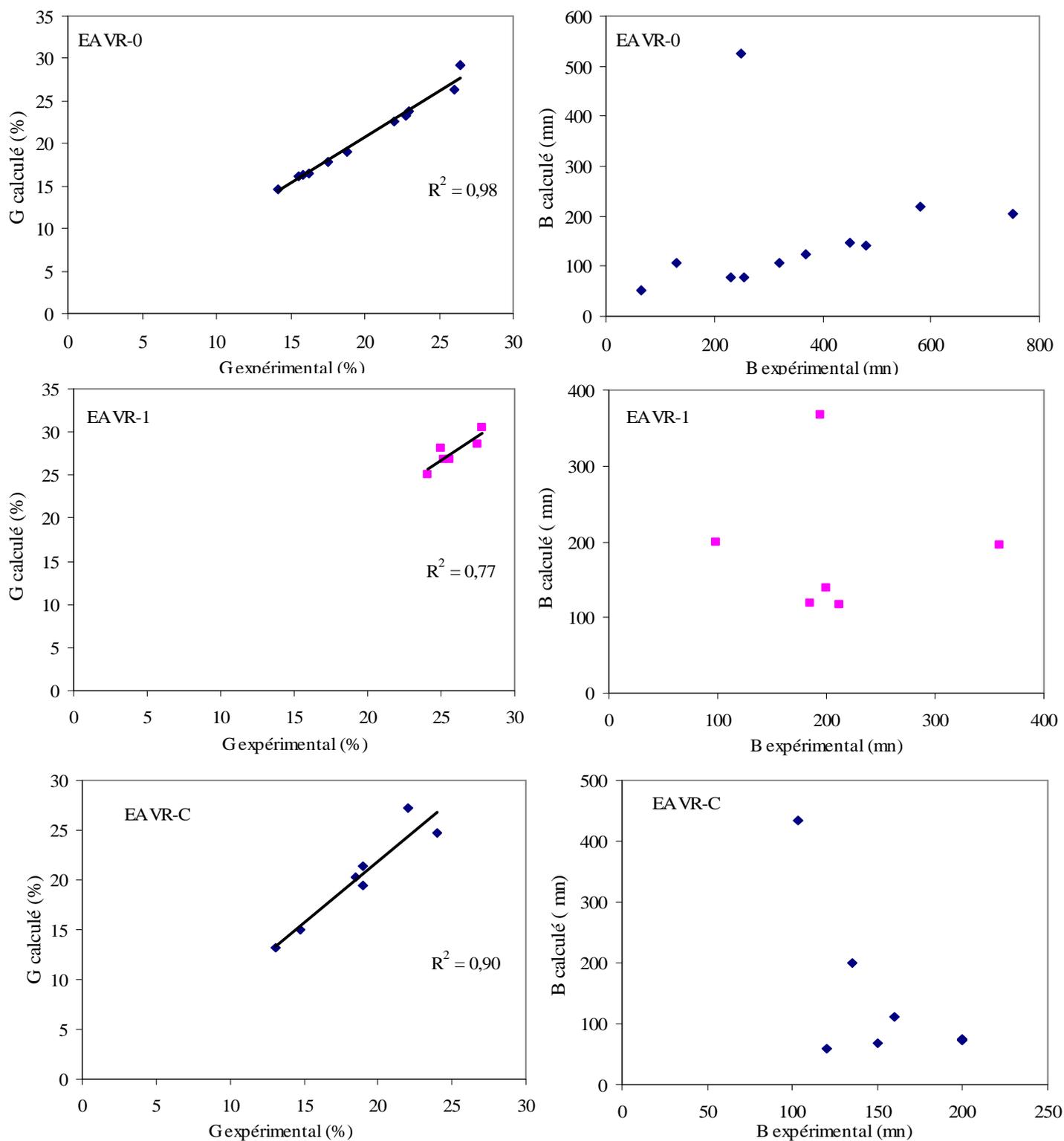


Figure 3.3.14 : Relation entre les taux de gonflement mesurés et calculés (à gauche), et relation entre les temps de demi-gonflement mesurés et calculés (à droite) pour les Argiles vertes de Romainville de l'Est testées dans leur état naturel

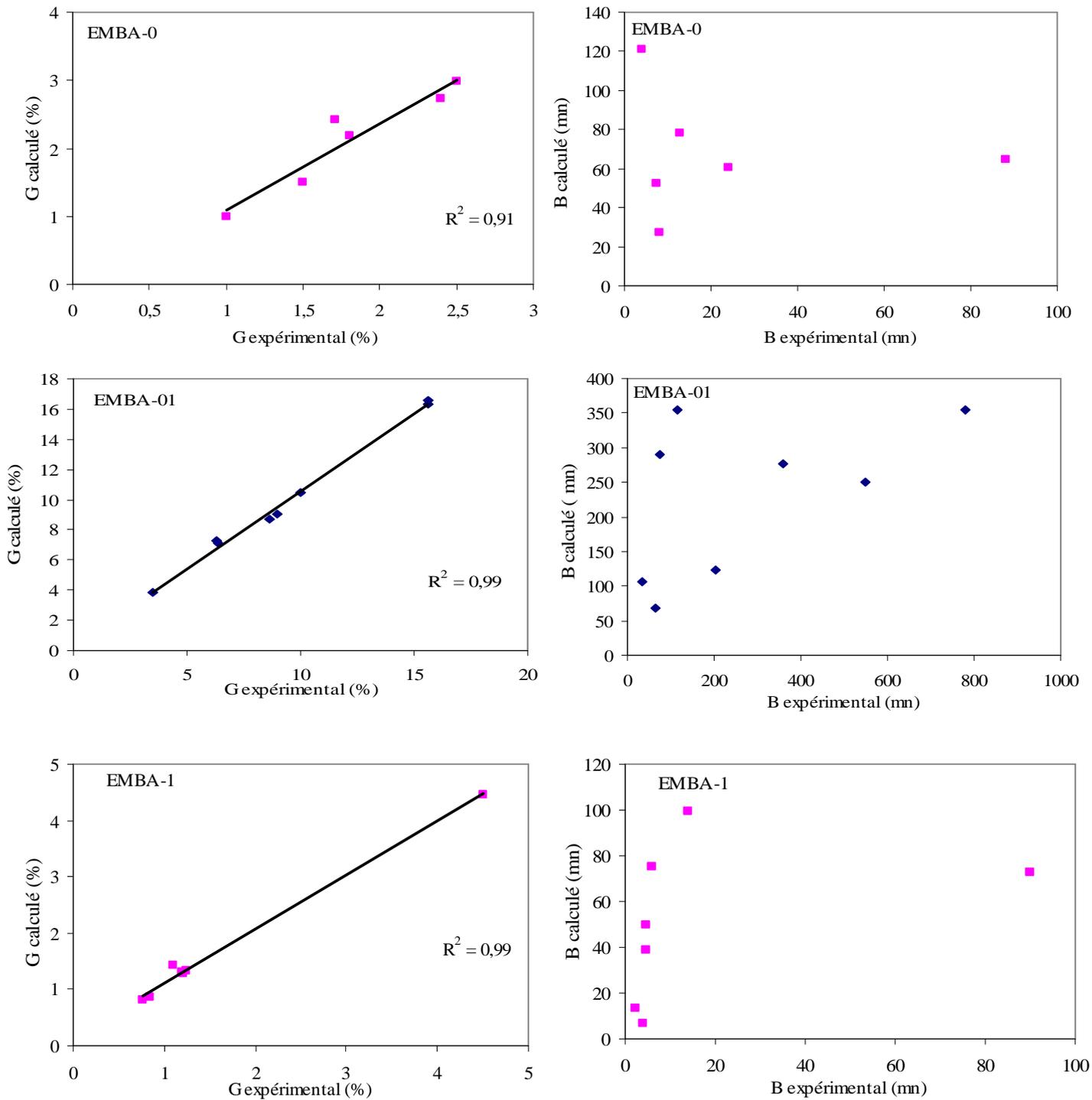


Figure 3.3.15 : Relation entre les taux de gonflement mesurés et calculés (à gauche), et relation entre les temps de demi-gonflement mesurés et calculé (à droite) pour les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est testées dans leur état naturel

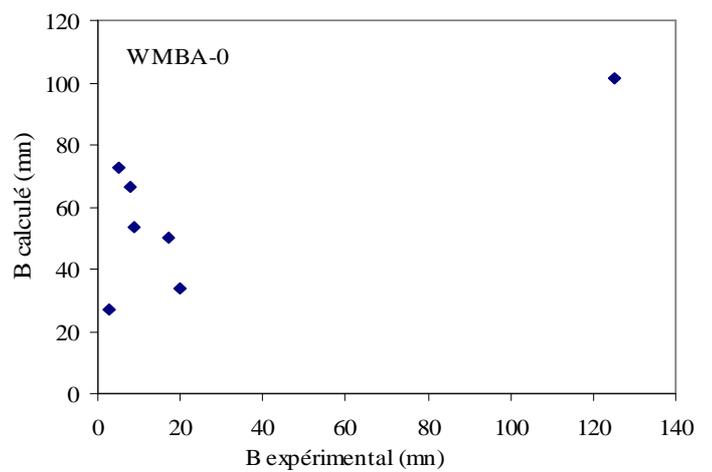
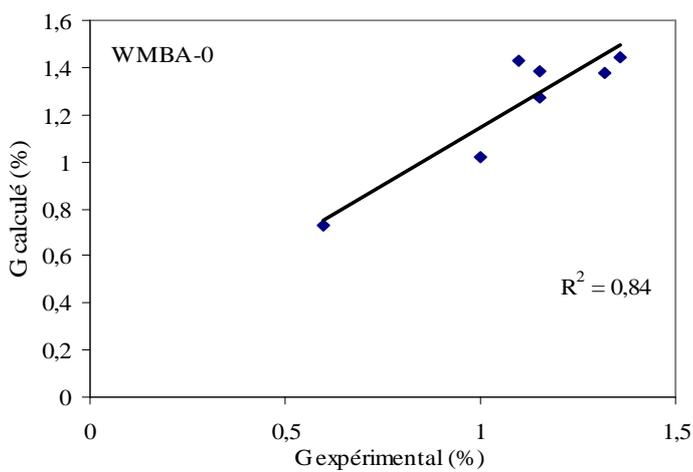
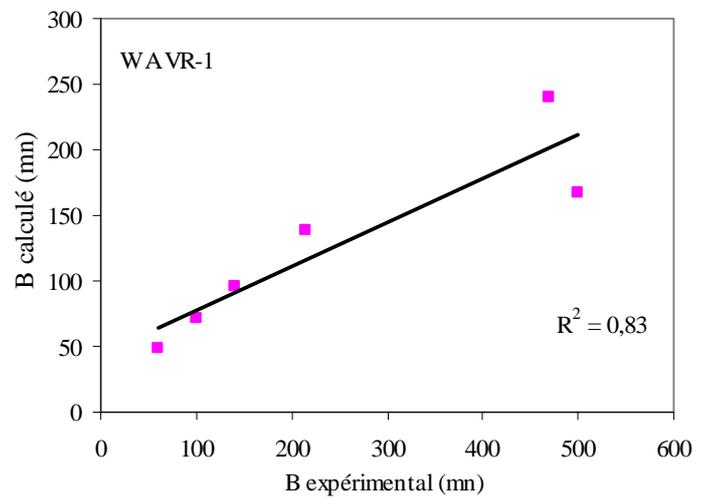
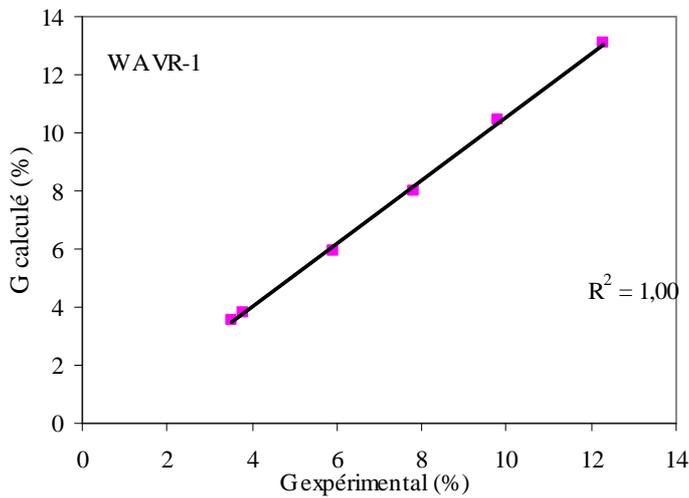
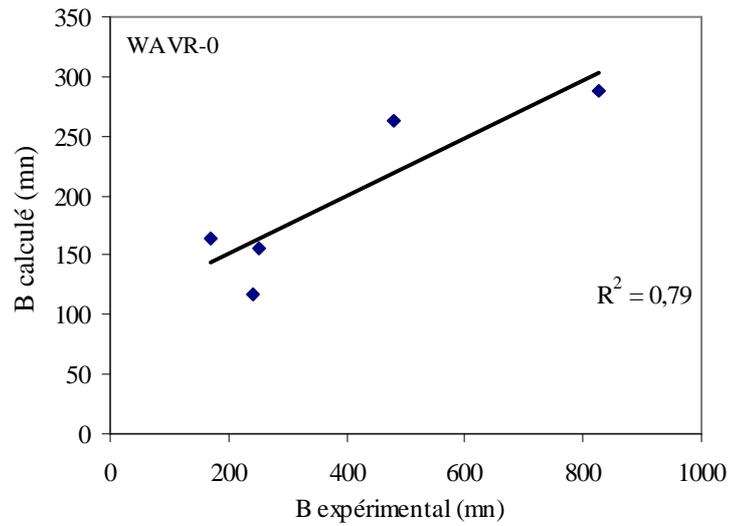
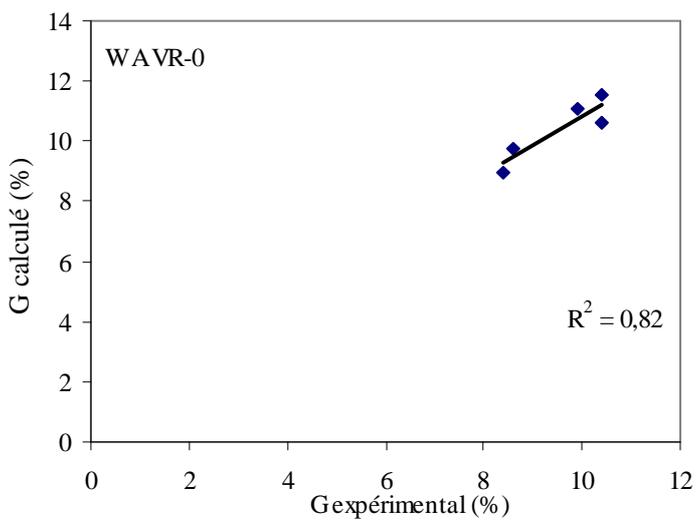


Figure 3.3.16 : Relation entre les taux de gonflement mesurés et calculés (à gauche), et relation entre les temps de demi-gonflement mesurés et calculés (à droite) pour les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest testées dans leur état naturel

3.3.3 Pression de gonflement

Le Tableau 3.3.3 et le Tableau 3.3.4 regroupent les résultats des pressions de gonflement obtenues sur l'ensemble des échantillons. Sur la Figure 3.3.17 sont donnés des exemples de mesure de pression de gonflement par la méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation. La Figure 3.3.18, la Figure 3.3.19 et la Figure 3.3.20 présentent les résultats obtenus par la méthode du volume constant.

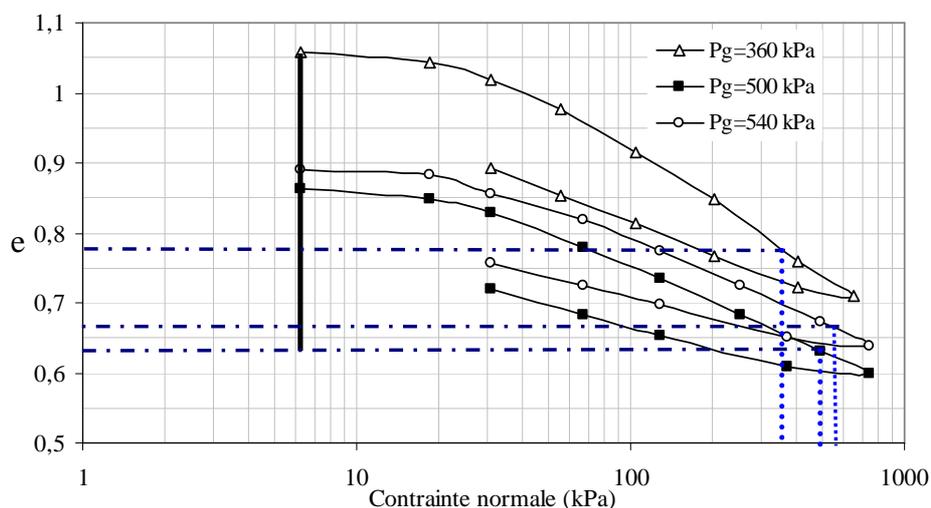


Figure 3.3.17 : Méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation. La pression de gonflement correspond à la pression pour laquelle l'échantillon repasse par la valeur de l'indice des vides initial.
Exemple de EAVR pour 3 indices des vides initiaux différents

Les résultats obtenus montrent que, d'une méthode à l'autre, les valeurs de la pression de gonflement mesurées sont assez différentes, mais aussi que pour une même méthode les valeurs obtenues varient. Par exemple, pour les échantillons EAVR-0, des valeurs comprises entre 360 et 990 kPa ont été obtenues par la méthode du gonflement libre. Cette dispersion des valeurs est due à une différence des conditions initiales, à laquelle peuvent s'ajouter de faibles variations inhérentes à l'appareillage. La variation de la pression de gonflement avec les conditions initiales et selon le chemin de contrainte appliqué montre la nature non intrinsèque du paramètre de gonflement.

Les valeurs obtenues par la méthode à volume constant, sont globalement moins dispersées et moins élevées, à l'exception des échantillons EMBA-1, que celles obtenues par la méthode du gonflement libre bien que les teneurs en eau de départ soient en général du même ordre de grandeur pour les deux méthodes. Les valeurs des pressions de gonflement des différents échantillons sont de l'ordre de :

- pour EAVR-1 : 900 kPa ;
- pour EAVR-0 : 700 kPa ;
- pour EAVR-C : 600 kPa ;
- pour EMBA-1 : 150 kPa à 235 kPa ;
- pour EMBA-01 : 450 kPa ;
- pour EMBA-0 : 180 kPa ;
- pour WAVR-0 : 200 kPa ;

- pour WAVR-1 : 170 kPa ;
- pour WMBA-0 : 160 kPa.

La dispersion des valeurs de pression de gonflement obtenues pour EMBA-1 est due à la fois à la variabilité des conditions initiales, mais aussi à la variabilité de la composition minéralogique (teneur en carbonates) et aux effets de structure (marnes litées ou non). Les valeurs les moins élevées sont mesurées pour les échantillons EMBA-1 qui sont plus compacts, plus indurés et plus carbonatés.

Les indices de compression calculés pour les Argiles vertes et pour les Marnes bleues litées sont dans la gamme de valeurs des argiles peu plastiques.

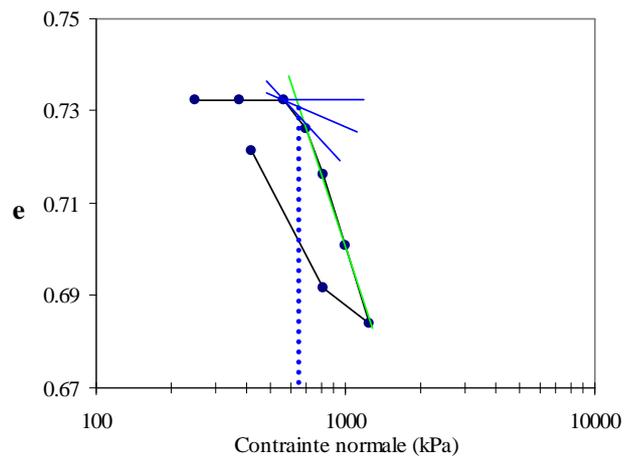
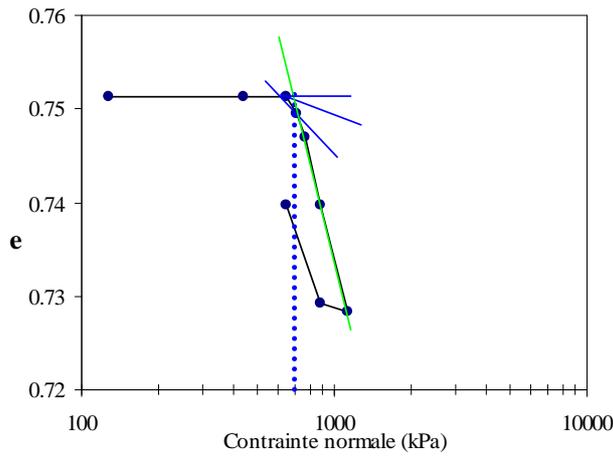
Tableau 3.3.3 : Pression de gonflement pour les Argiles vertes et les Marnes bleues de l'Est
(Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation)

échantillons	w _o (%)	w _f (%)	H _o (mm)	γ _h (kN.m ⁻³)	γ _d (kN.m ⁻³)	e ₀	C _c	C _g	σ _g (kPa)	Méthode
E-AVR-1	25,8	41,4	20,1	19,9	15,8	0,77	0,13	0,14	910	VC
	25,9	42,3	20,2	20,0	15,9	0,77	0,11	0,13	900	VC
E-AVR-0 (perp)	29,1	43,0	12,0	19,0	14,7	0,90			360	GL-C
	25,0	33,0	12,0	19,6	15,7	0,78			540	GL-C
	24,9	33,8	12,0	20,0	16,0	0,74			500	GL-C
	25,0	32,9	24,0	19,9	15,9	0,75			990	GL-C
	23,6	35,7	12,0	20,1	16,3	0,72			990	GL-C
	25,5	37,8	12,0	19,5	15,5	0,80	0,11	0,14	700	VC
	23,6	36,4	12,0	19,5	15,8	0,77	0,18	0,17	670	VC
E-AVR-C	28,1	40,4	20,1	19,7	15,4	0,85			900	GL-C
	29,1	40,5	20,1	19,4	15,0	0,83			950	GL-C
	27,8	40,4	20,1	19,7	15,4	0,82	0,15	0,09	600	VC
	26,7	36,9	20,1	20,0	15,8	0,76	0,13	0,10	600	VC
E-MBA-1 (littée) (littée)	27,6	28,4	12,0	19,2	15,0	0,83			80	GL-C
	28,6	29,7	12,0	18,5	14,4	0,91			90	GL-C
	27,1	29,2	12,0	19,1	15,1	0,83	0,07	0,10	150	VC
	38,3	39,9	12,0	18,1	13,1	1,11	0,15	0,11	180	VC
	37,3	39,0	12,0	18,1	13,2	1,08	0,17	0,07	235	VC
E-MBA-01	26,7	32,1	20,1	19,8	15,6	0,81			550	GL-C
	23,9	31,9	20,0	20,0	16,1	0,74			750	GL-C
	29,9	35,8	20,1	19,6	15,1	0,86	0,13	0,07	450	VC
	27,0	29,6	20,1	20,0	15,8	0,78	0,09	0,05	470	VC
E-MBA-0	37,3	39,1	20,0	18,5	13,5	1,01			207	GL-C
	38,0	39,4	20,0	18,4	13,4	1,03			165	GL-C
	37,9	39,3	20,0	18,4	13,3	1,03	0,08	0,07	180	VC
	37,6	39,0	20,0	18,5	13,4	1,02	0,08	0,07	160	VC

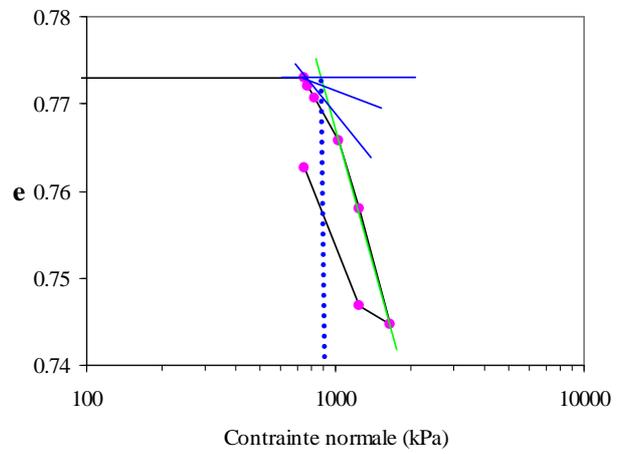
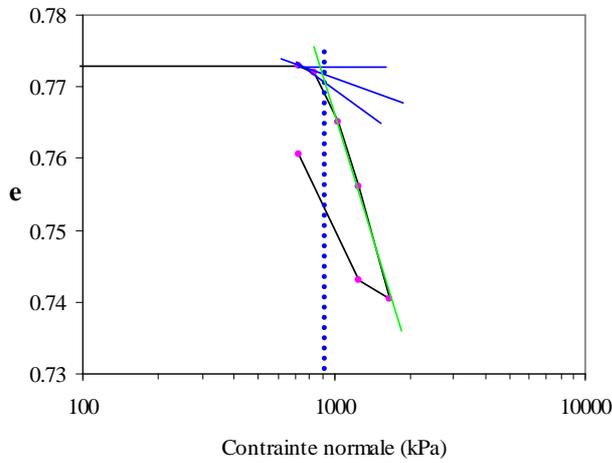
Tableau 3.3.4 : Pression de gonflement pour les Argiles vertes de l'Ouest (Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation)

échantillons	w_o (%)	w_f (%)	H_o (mm)	γ_h (kN.m ⁻³)	γ_d (kN.m ⁻³)	e_0	Cc	Cg	σ_g (kPa)	Méthode
W-AVR-0	32,0	39,4	20,1	19,3	14,6	0,83			270	GL-C
	32,0	39,0	20,0	19,3	14,6	0,84			230	GL-C
	32,2	39,5	15,0	19,5	14,8	0,82			250	GL-C
	32,1	38,5	20,1	19,3	14,6	0,83	0,11	0,10	190	VC
	31,9	40,1	15,0	19,6	14,8	0,81	0,12	0,10	210	VC
W-AVR-1	30,3	40,1	20,1	19,40	14,9	0,80			400	GL-C
	30,6	38,9	20,0	19,50	15,0	0,80			480	GL-C
	31,9	39,1	20,1	19,4	14,7	0,80	0,11	0,08	160	VC
	33,0	38,1	20,1	19,5	14,7	0,78	0,12	0,08	170	VC
W-MBA-0	28,0	29,3	20	19,6	15,3	0,68			240	GL-C
	27,5	28,1	20	19,9	15,6	0,65			220	GL-C
	29,1	29,8	20	19,7	15,2	0,70	0,06	0,03	150	VC
	27,9	28,9	20	19,7	15,4	0,69	0,07	0,02	160	VC

EAVR-0



EAVR-1



EAVR-C

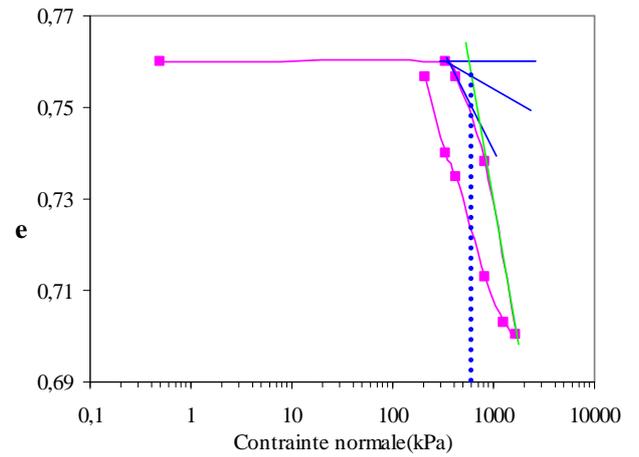
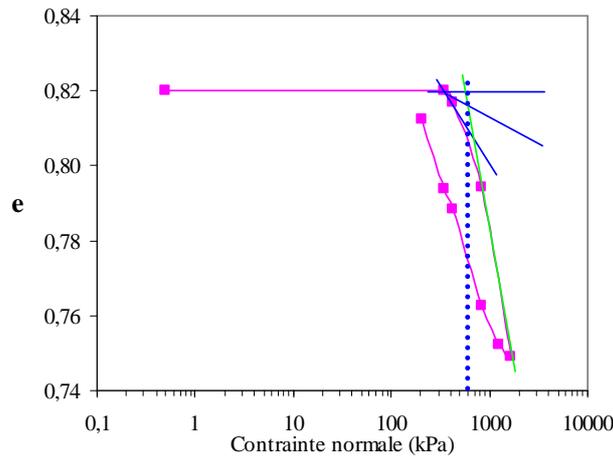
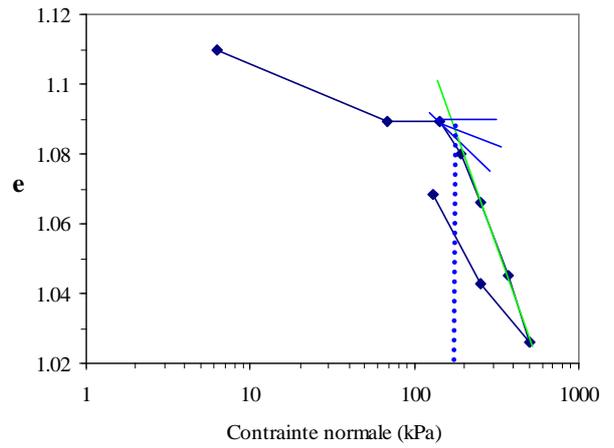
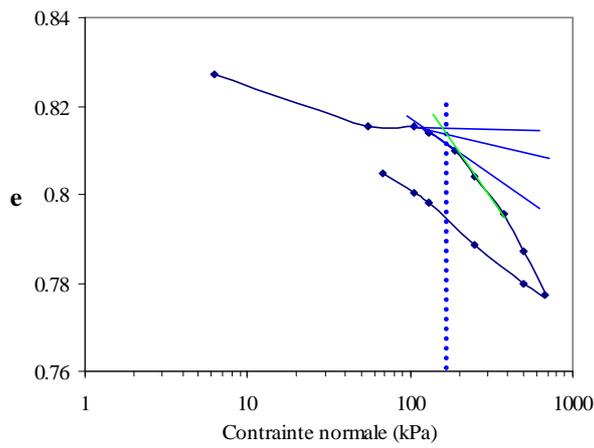
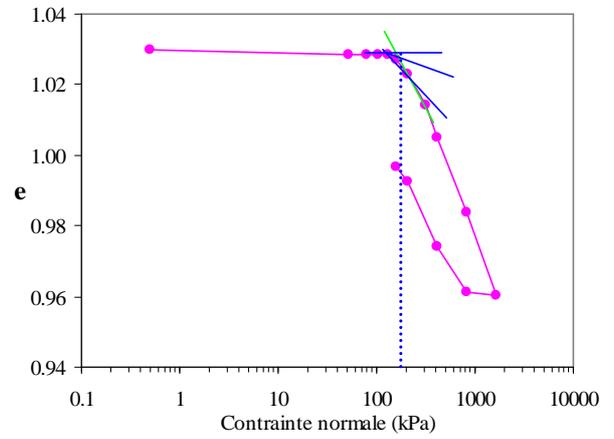
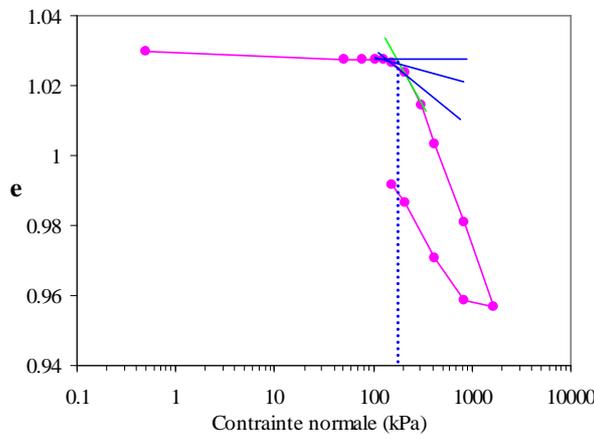


Figure 3.3.18 : Détermination de la pression de gonflement par la méthode du volume constant pour les Argiles vertes de Romainville de l'Est testées dans leur état naturel

EMBA-1



EMBA-01



EMBA-0

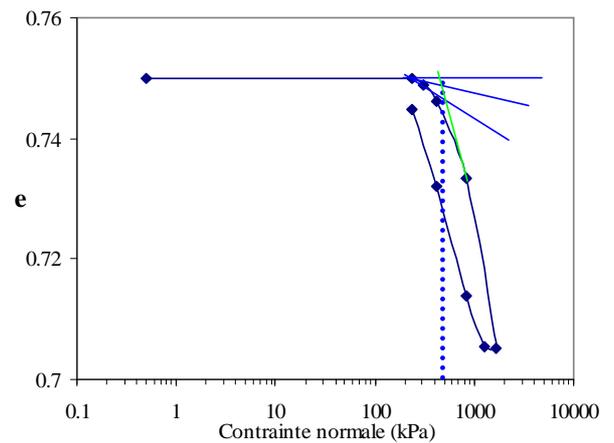
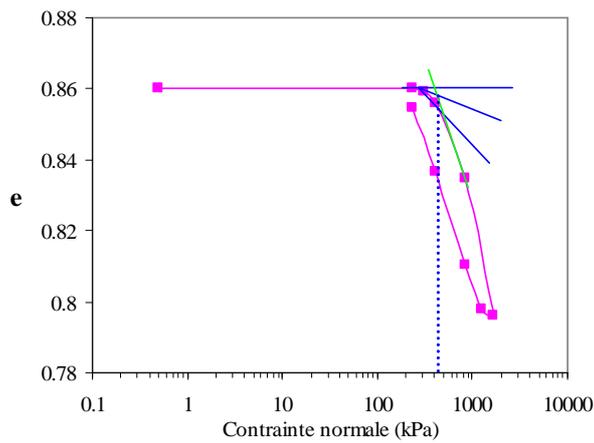
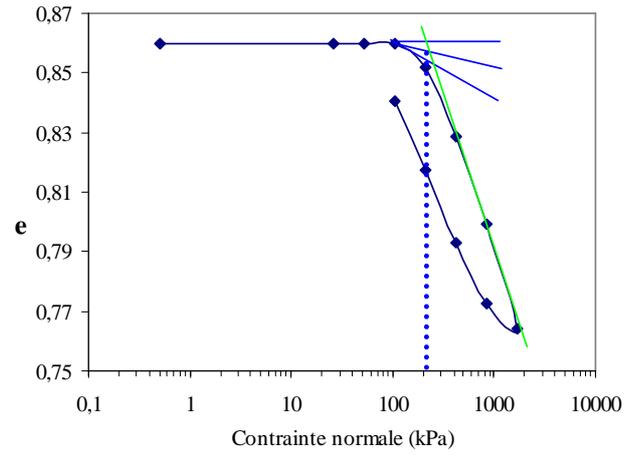
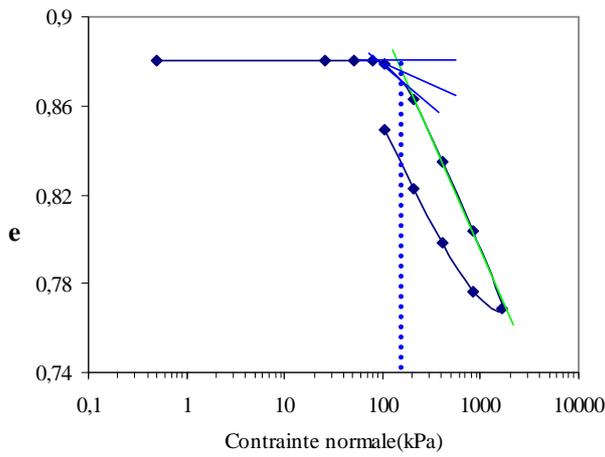
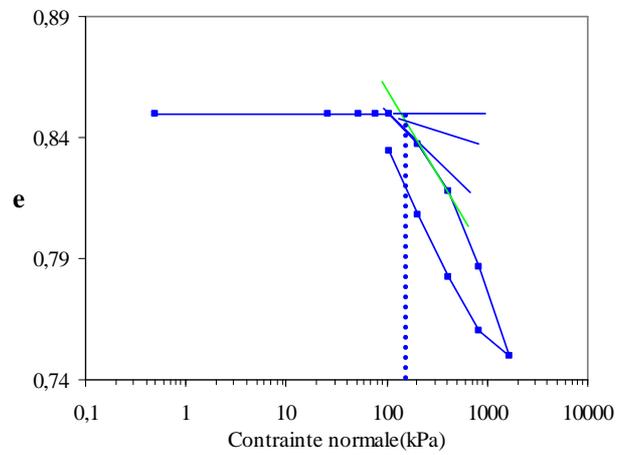
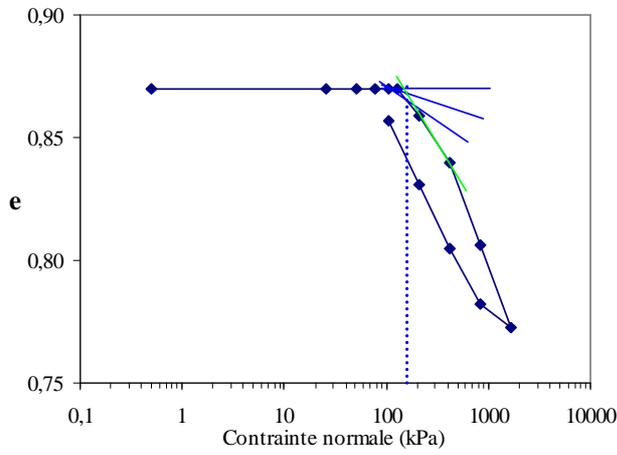


Figure 3.3.19 : Détermination de la pression de gonflement par la méthode du volume constant pour les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est testées dans leur état naturel

WAVR-0



WAVR-1



WMBA-0

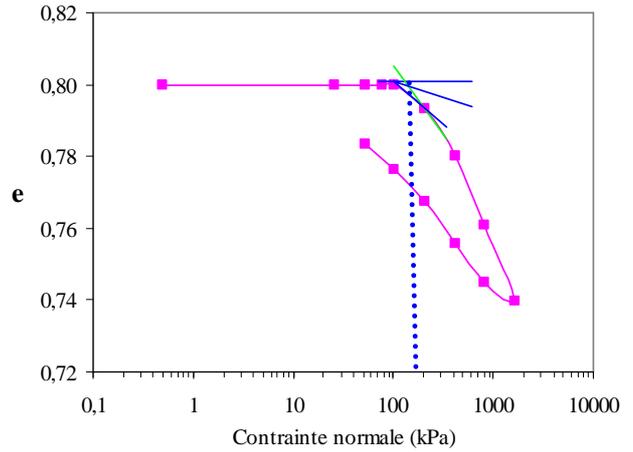
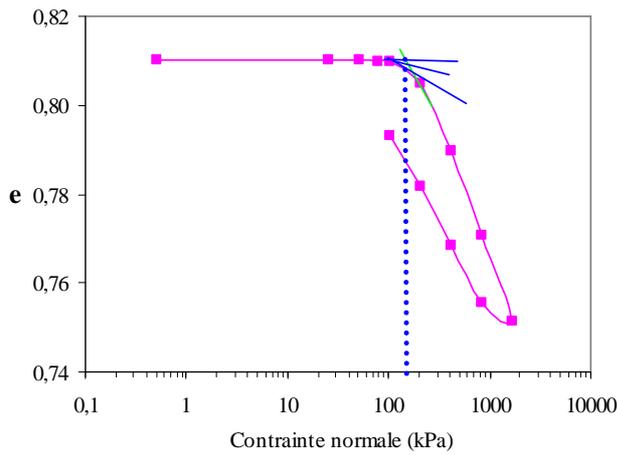


Figure 3.3.20 : Détermination de la pression de gonflement par la méthode du volume constant pour les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil de l'Ouest testées dans leur état naturel

3.4 Méthodes indirectes

Afin d'évaluer l'applicabilité et l'utilité des nombreux modèles empiriques de prévision proposés par différents auteurs, une estimation des paramètres de gonflement des sols étudiés (taux de gonflement et pression de gonflement) a été effectuée, en utilisant quelques modèles empiriques qui font intervenir en plus des paramètres géotechniques simples, les conditions initiales comme la teneur en eau et/ou le poids volumique sec (Tableau 3.4.1).

Les modèles empiriques utilisés ont été développés à partir de l'analyse des résultats obtenus, à la fois sur des sols compactés à l'optimum Proctor (équations 1, 4, 6 et 10) et aussi, sur des sols naturels intacts à différentes teneurs en eau et différents poids volumiques secs (équations 2, 3, 5, 8 et 9).

Tableau 3.4.1 : Modèles de prévision testés pour le gonflement des sols étudiés

<i>Modèles empiriques</i>	<i>Expression mathématique</i>
<i>Taux de gonflement (Tg)</i>	
Nayak et Christensen (1971) * (eq.1)	$Tg = 0.0229(Ip)^{1.45} \frac{C2}{w_o} + 6,38$
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973) (eq.2 et eq.3)	$\lg(Tg) = \frac{1}{19,5} (6,242\gamma_d + 0,65 w_L - 130,5) ;$ $\lg(Tg) = \frac{1}{12} (0,4w_L - w_o + 5,5)$
Brackley (1975) (eq.4)	$Tg = (5,3 - \frac{147e_o}{Ip} - \lg(p)) \cdot (0,525Ip + 4,1 - 0,85w_o)$
Weston (1980) (eq.5)	$Tg = 4,11 \cdot 10^{-4} (w_{LL})^{4,17} (p)^{-0,386} (w_o)^{2,33} ;$ où $w_{LL} = w_L \left(\frac{\% < 40\mu m}{100} \right)$
Johnson et Snethen (1978) (eq.6)	$\lg(Tg) = 0,036w_L - 0,0833w_o + 0,458$
<i>Pression de gonflement (Pg)</i>	
Nayak et Christensen (1971) * (eq.7)	$Pg (t/m^2) = 0,035817 \cdot (Ip)^{1,12} \left(\frac{C2}{w_o} \right)^2 + 3,7912 ;$ méthode à volume constant
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973) (eq.8 et 9)	$\lg(Pg) = \frac{1}{19,5} (6,242\gamma_d + 0,65 w_L - 139,5) ;$ $\lg(Pg) = \frac{1}{12} (0,44w_L - w_o - 0,4)$ Pg (t/m ²), méthode à volume constant
Brackley (1975) (eq.10)	$\lg(Pg) = (5,3 - \frac{147e_o}{Ip}) \quad Pg \text{ en kPa}$

*cités par Zein 1987

IP : indice de plasticité, C2 : % < 2µm, w_o : teneur en eau, γ_d : poids volumique sec (kN.m⁻³), p : contrainte normale (kPa), e_o : indice de vide

Les résultats des estimations des taux de gonflement sont donnés dans le Tableau 3.4.2. De grands écarts sont constatés entre les valeurs des paramètres de gonflement directement mesurées et celles fournies par les modèles. Ceci montre que, globalement, les modèles étudiés sont inadaptés pour estimer le gonflement des sols étudiés.

Seul le taux de gonflement des Argiles vertes de Romainville de l'Est estimé par le modèle de Nayak et Christensen reste globalement dans l'intervalle des valeurs mesurées expérimentalement. Ce modèle fait intervenir des paramètres qui semblent déterminants dans le comportement gonflant des ces argiles : l'indice de plasticité, la fraction argileuse et la teneur en eau naturelle. Cependant, il surestime de façon considérable le pourcentage de gonflement de tous les autres échantillons testés. Cette surestimation est due à la grande sensibilité du modèle à l'indice de plasticité (I_p).

Les modèles de Vijayvergiya et Ghazzaly, de Weston et de Johnson et Snethen sous-estiment le taux de gonflement des Argiles vertes de Romainville et surestiment le taux de gonflement des Marnes bleues d'Argenteuil. Ces modèles sont très sensibles à la limite de liquidité et de la teneur en eau naturelle.

La même remarque s'applique aux résultats du modèle de Brackley. Les prévisions de gonflement de ce modèle ne sont pas comparables aux mesures. Ce modèle est très sensible à la teneur en eau naturelle.

Les valeurs estimées pour les pressions de gonflement à l'aide de ces modèles sont inférieures aux résultats expérimentaux dans le cas des Argiles vertes de Romainville (Tableau 3.4.3).

Pour les autres sols, le modèle de Nayak et Christensen donne des valeurs de pression de gonflement dans l'intervalle des valeurs mesurées expérimentalement.

Les modèles de Vijayvergiya et Ghazzaly, et de Brackley surestiment la pression de gonflement pour EMBA-01 et un des échantillons de EMBA-1 et la sous-estiment généralement pour les autres sols. Comme nous l'avons souligné précédemment (cf paragraphe 3.3.1), EMBA-01 présente un comportement très différent des autres sols.

Certains modèles utilisés sont déterminés à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui des échantillons naturels correspondants. Les écarts importants constatés entre les gonflements mesurés et les valeurs des modèles indiquent que le gonflement des sols étudiés est probablement régi par des paramètres non représentés dans les modèles utilisés. Ces paramètres non pris en compte dans les modèles de prévision proviennent de la nature minéralogique des sols et de leur microstructure interne. Des caractéristiques tels que la nature des minéraux constituant la fraction non gonflante (carbonates dans les Marnes bleues d'Argenteuil par exemple), la forme des particules et leur arrangement structurel affectent considérablement le gonflement des sols. Même si les paramètres qui sont utilisés dans les expressions des modèles de prévision dépendent étroitement de ces caractéristiques structurelles, ces dernières n'interviennent pas explicitement dans les modèles.

Tableau 3.4.2 : Taux de gonflement mesuré et estimé pour les sols étudiés dans l'état naturel

Echantillons	w _o (%)	γ _d (kN.m ⁻³)	Poids du Piston (kPa)	Taux de gonf. mesuré (%)	Taux de gonflement estimé (%)					
					Eq.1	Eq.2	Eq.3	Eq.4	Eq.5	Eq.6
E-AVR-0	22,0	15,9	6,3	17,5	20,5	7,9	13,3	5,1	9,1	21,2
	27,8	14,7	6,3	15,8	17,5	3,3	4,4	-0,8	5,3	7,0
	23,0	16,3	6,3	21,7	19,8	10,6	11,0	4,3	8,2	17,5
	24,3	16,0	6,3	14,2	19,1	8,5	8,6	2,5	7,2	13,6
	23,6	15,7	6,3	13,6	19,5	6,8	9,8	3,0	7,7	15,6
	24,9	15,8	2,0	18,8	18,8	7,3	7,6	2,4	10,6	12,1
	28,0	15,0	2,0	16,2	17,4	4,1	4,2	-1,8	8,1	6,7
	26,0	15,9	2,0	15,5	18,3	7,9	6,2	0,7	9,6	9,8
	22,7	16,3	2,0	22,8	20,0	10,6	11,7	6,4	13,2	18,5
	23,8	16,3	2,0	23,0	19,4	10,6	9,4	4,5	11,8	15,0
	25,4	15,8	0,7	26,4	18,6	7,3	6,9	2,0	15,2	11,0
	24,7	15,7	0,7	26,0	18,9	6,8	7,9	3,3	16,3	12,6
E-AVR-1	21,8	16,4	0,7	23,0	20,3	9,1	11,0	8,3	18,7	17,1
	25,3	16,0	0,7	27,8	18,4	6,8	5,6	1,0	13,2	8,8
	26,4	15,7	0,7	25,6	17,9	5,4	4,6	-1,0	12,0	7,1
	17,9	16,9	0,7	27,8	23,4	13,1	23,3	17,8	29,7	36,2
E-AVR-C	24,9	15,8	2,0	18,5	19,7	8,1	8,2	3,4	11,5	13,2
	25,9	15,9	2,0	19,0	19,2	8,5	6,8	1,9	10,5	10,9
	21,8	16,7	2,0	24,0	21,5	15,6	14,9	10,1	15,6	23,8
	27,1	15,4	2,0	19,0	18,6	6,0	5,4	-0,1	9,4	8,6
	28,2	15,0	2,0	22,0	18,1	4,4	4,4	-1,6	8,6	7,0
E-MBA-1	23,2	16,5	2,0	1,2	26,8	36,0	31,0	26,6	26,7	53,6
	23,7	16,5	2,0	0,8	26,4	36,0	28,2	25,1	25,4	48,7
	23,4	16,6	2,0	0,8	26,7	38,7	29,9	26,4	26,2	51,6
	23,4	16,6	2,0	1,2	26,7	38,7	29,9	26,1	26,2	51,6
	32,4	14,2	0,7	4,5	21,0	6,6	5,3	3,1	18,4	9,2
	27,5	15,0	6,3	1,2	23,6	11,9	13,6	10,3	11,6	23,5
	27,6	14,4	6,3	1,1	23,6	7,7	13,3	8,8	11,5	23,1
E-MBA-01	23,8	16,4	2,0	3,8	33,8	61,1	51,5	43,8	33,5	93,5
	25,5	15,8	2,0	8,6	31,9	39,1	36,6	36,2	28,3	66,5
	27,0	15,5	2,0	10,0	30,5	31,2	27,4	31,3	24,8	49,8
	26,7	15,6	0,5	6,4	30,8	35,1	29,2	39,7	43,5	53,0
	23,9	16,1	0,5	6,3	33,6	49,8	49,7	50,5	56,2	90,3
E-MBA-0	37,0	13,4	0,8	2,5	18,8	2,9	1,7	-9,5	10,4	3,0
	39,9	12,9	0,7	1,5	17,9	2,0	1,0	-12,7	9,2	1,7
	34,6	13,4	0,5	2,4	19,7	2,9	2,8	-6,6	14,6	4,7
	35,7	13,5	0,5	1,0	19,3	3,1	2,2	-8,7	13,6	3,8
	34,7	13,5	2,0	1,8	19,6	3,0	2,7	-4,9	8,5	4,6
	39,0	13,4	2,0	1,7	18,2	2,8	1,2	-9,8	6,5	2,0

Echantillons	w _o (%)	γ _d (kN.m ⁻³)	Poids de Piston (kPa)	Taux de gonf. mesuré (%)	Taux de gonflement estimé (%)					
					Eq.1	Eq.2	Eq.3	Eq.4	Eq.5	Eq.6
W-AVR-0	32,2	14,8	0,5	10,4	17,5	2,1	1,1	-9,5	7,0	1,7
	32,0	14,8	0,5	9,0	17,5	2,1	1,1	-9,2	7,1	1,7
	32,0	14,6	0,5	9,9	17,6	1,8	1,2	-8,5	7,1	1,8
	32,0	14,6	0,5	8,6	17,5	1,8	1,1	-8,6	7,1	1,7
	29,9	15,0	2,0	8,4	18,3	2,4	1,7	-4,3	4,9	2,6
	29,8	15,1	2,0	10,4	18,4	2,6	1,7	-4,3	4,9	2,6
W-AVR-1	31,1	14,8	2,0	5,9	15,8	1,4	0,9	-5,5	2,8	1,4
	31,6	14,6	2,0	7,8	15,6	1,2	0,8	-5,1	2,7	1,2
	30,3	14,9	2,0	9,8	16,1	1,5	1,1	-4,8	3,0	1,6
	30,6	15,0	2,0	12,3	15,9	1,6	1,0	-5,1	2,9	1,5
	32,6	14,3	0,5	3,8	15,4	1,0	0,7	-9,0	4,3	1,0
	32,5	14,5	0,5	3,5	15,4	1,1	0,7	-9,9	4,3	1,0
W-MBA-0	28,0	15,3	0,5	1,1	19,9	2,2	1,8	-1,8	6,9	2,7
	27,5	15,6	0,5	0,6	20,1	2,7	2,0	-0,9	7,2	3,0
	27,9	15,2	2,0	1,1	20,0	2,0	1,9	-1,2	4,1	2,8
	26,8	15,4	2,0	1,1	20,5	2,3	2,3	0,5	4,5	3,4
	25,6	15,9	2,0	1,4	21,2	3,4	2,9	2,5	5,0	4,3
	25,9	15,9	2,0	1,4	21,0	3,4	2,7	2,0	4,9	4,0
	26,3	15,7	2,0	1,0	20,8	2,9	2,5	1,2	4,7	3,7

* le signe négatif indique un tassement

Tableau 3.4.3 : Pression de gonflement mesurée et estimée pour les sols étudiés dans l'état naturel

Echantillons	w _o (%)	γ _d (kN.m ⁻³)	Pression de gonflement mesurée (kPa)	Pression de gonflement estimée (kPa)			
				Eq.7	Eq.8	Eq.9	Eq.10
E-AVR-0	25,5	15,5	700	213	202	215	87
	23,6	15,8	670	243	244	310	116
E-AVR-1	25,8	15,8	910	213	201	162	94
	25,9	15,9	900	211	205	159	94
E-AVR-C	27,8	15,4	600	198	200	149	89
	26,7	15,8	600	212	268	185	157
E-MBA-1 (litée) (litée)	27,1	15,1	150	254	434	464	506
	38,3	13,1	180	146	99	54	67
	37,3	13,2	235	152	107	65	84
E-MBA-01	30,0	15,1	450	274	790	491	1208
	27,0	15,8	470	330	1331	873	1943
E-MBA-0	37,3	13,5	207	168	102	52	58
	38,0	13,4	165	164	96	45	50
W-AVR-0	32,1	14,6	190	185	62	35	40
	31,9	14,8	210	187	71	37	49
W-AVR-1	31,9	14,7	160	155	45	25	20
	33,0	14,7	170	148	44	20	25
W-MBA-0	29,1	15,2	150	229	70	46	98
	27,9	15,4	160	247	79	59	108

3.5 Conclusion

Ce chapitre regroupe l'ensemble des essais de gonflement conduits sur les sols étudiés dans leurs états naturel et remanié.

Les essais de gonflement libre ont permis de définir le potentiel de gonflement et la pression de gonflement des sols argileux prélevés de l'Est et de l'Ouest de Paris. Cependant, les variations de ces grandeurs sont fonction de l'état initial du sol (teneur en eau, densité sèche), de la charge et du chemin de contrainte appliqués.

Une forte aptitude au gonflement a été observée pour les Argiles vertes de Romainville dans leurs états naturel et remanié. Par contre, malgré leur limite de plasticité plus élevée que les Argiles vertes, les Marnes bleues d'Argenteuil montrent un gonflement très faible dans leur état naturel, seul l'état remanié présentant une forte aptitude au gonflement. La différence de comportement observée entre les échantillons intacts et remaniés peut être attribuée à la présence de liaison (ou de ciment) entre les grains qui s'oppose aux pouvoir gonflant des argiles. A l'état remanié la rupture des liaisons entre les minéraux et la déstructuration du sol facilite l'accès de l'eau aux argiles et leur permet ainsi d'exprimer leurs propriétés de gonflement. Cela veut dire que, en terme d'effets de structure, l'espace poreux disponible dans le sol et les liaisons entre les grains qui lui sont associé, jouent un rôle dans les variations de volume observées à une échelle macroscopique. Ces observations sont en accord avec les observations faites par Le Roux (1972), Pejon et al. (1997), Bauer-Plaindoux et al. (1997), et Serratrice (2007) qui ont remarqué que la seule connaissance de la composition minéralogique des marnes ne permet pas d'expliquer le comportement de ces matériaux en présence d'eau et que leur structure jouent un rôle prépondérant au cours du gonflement.

L'étude menée sur la prévision du taux et de la pression de gonflement, en privilégiant les modèles basés sur des paramètres, obtenus sur sol remanié, faciles à déterminer en laboratoire, a montré que les modèles de prévision ne sont pas automatiquement applicables à des sols autres que ceux qui ont servi à leur établissement. Globalement, les résultats des calculs effectués avec l'ensemble des modèles diffèrent des mesures.

Chapitre 4 Comportement des sols étudiés sous sollicitations hydriques cycliques

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédant nous avons exposé les résultats du taux de gonflement des sols, obtenus à partir d'essais de gonflement libre par une simple phase d'imbibition. Cependant, dans la nature, les matériaux argileux sont soumis à des cycles répétés d'humectation et de dessiccation pour lesquels l'état initial et l'état final changent d'un cycle à l'autre. Afin d'étudier l'effet de cycles de séchage-imbibition sur le comportement des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil, des essais de gonflement libre ont été menés au laboratoire sur des éprouvettes soumises à des sollicitations hydriques cycliques. Dans ce chapitre seront présentés les protocoles d'essais adoptés et les résultats obtenus au cours des essais menés sur EAVR-0, EMBA-1, EMBA-01 et EAVR-C.

4.2 Procédure Expérimentale

Les essais sont menés dans des moules cylindriques de type œdométrique en plexiglas (Figure 4.2.1 a) selon la procédure ASTM, D 4546-85 méthode A.

Des échantillons taillés à partir d'un même bloc sont mis en place suivant les procédures décrites au chapitre précédent. Les éprouvettes sont soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet. Le 1^{er} cycle commence par une phase d'imbibition à partir de la teneur en eau initiale. Après stabilisation du gonflement pour chaque cycle, l'eau dans les moules est vidée et les échantillons sont mis dans une étuve à température contrôlée à 45°C (Figure 4.2.1 b). Le retrait des échantillons est suivi jusqu'à stabilisation des déformations sous une charge verticale correspondant au poids du piston. Le processus de séchage est très lent et prend environ six semaines. Même si des retraits latéraux et des fissures sont observés lors des cycles de séchage, ceux-ci ne sont pas pris en compte dans le calcul du gonflement pour le cycle suivant car le sol retrouve son diamètre de départ lors de l'imbibition. Il est bien entendu qu'un sol fissuré se déforme de façon tridimensionnelle, la déformation mesurée ΔH est supposée inclure les déformations uni- et tri-dimensionnelles (Dif et al., 1991 ; Day 1994, 1995 ; Basma et al, 1996). Par conséquent, les résultats de déformation sont donnés par le ratio de déformation axiale $\Delta H/H_i$. Le taux du retrait est calculé à partir de l'épaisseur de l'éprouvette à la fin du cycle précédant le gonflement.

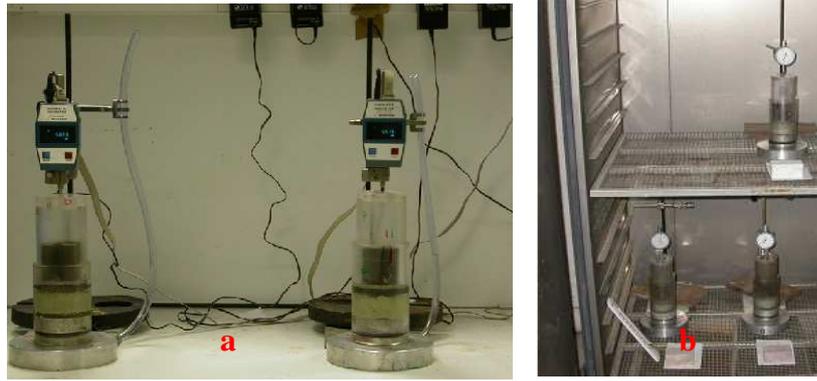


Figure 4.2.1 : Appareillage a) moules cylindriques en plexiglas b) étuve de séchage

4.3 Sols étudiés et résultats

4.3.1 Les Argiles vertes de Romainville de l'Est inférieures (EAVR-0)

Cinq échantillons sont taillés à partir d'un même bloc afin d'analyser la microstructure au cours des essais cycliques (cf. chapitre 5). Ainsi, Ech-0 est arrêté à la fin de la première phase de gonflement, Ech-I à la fin de la troisième phase de gonflement, et Ech-II à la fin de la cinquième phase de gonflement. Les échantillons Ech-III et Ech-IV sont soumis à des cycles supplémentaires. Les paramètres géotechniques : la teneur en eau initiale, la densité sèche initiale, la teneur en carbonates et la pression verticale appliquée, sont données dans le Tableau 4.3.1. Dans ce tableau, on note tout d'abord que même si tous les échantillons sont taillés à partir d'un même bloc, les conditions initiales ne sont pas identiques. Ceci peut être expliqué d'une part par une hétérogénéité de la distribution de la teneur en eau et de la teneur en carbonates à l'état naturel et d'autre part par un séchage partiel lors de la taille et de la mise en place des éprouvettes. Cette disparité de l'état initial est supposée ne pas avoir d'influence à partir du deuxième ou troisième cycle de gonflement.

Tableau 4.3.1 : Paramètres des échantillons EAVR-0 soumis à des essais cycliques

Paramètres	Ech-0	Ech-I	Ech-II	Ech-III	Ech-IV
Teneur en eau initiale, $w(\%)$	24,9	28,2	26	22,7	23,8
Teneur en carbonates, (%)	17,3	17,6	15,3	17,9	14,4
Poids volumique sec, initial, $\gamma_d (kN.m^{-3})$	15,8	15	15	16,3	16,3
Pression verticale due au piston (kPa)	2	2	2	2	2

Les cinétiques de gonflement des échantillons sont représentées sur la Figure 4.3.1. La cinétique de gonflement lors du premier cycle est plus lente que les suivantes. Ceci témoigne de la faible perméabilité du matériau. A partir du deuxième cycle le gonflement est sensiblement plus rapide, suggérant une perméabilité plus élevée ou l'existence de chemins préférentiels. En effet, l'ouverture de fissures de retrait au cours du séchage (Figure 4.3.2 b) entraîne la création de chemins préférentiels empruntés par l'eau lors du processus de réhumidification suivant.

La Figure 4.3.3 représente les taux de gonflement et de retrait des différents cycles de sollicitations hydriques. Dans le premier cycle, le taux de gonflement est contrôlé par la teneur en eau initiale, les échantillons présentant une faible teneur en eau initiale montrent les taux de gonflement les plus grands. La déformation maximale se produit au deuxième cycle.

A partir du troisième cycle, le taux de gonflement semble se stabiliser (taux de gonflement compris entre 19 et 21 %), à l'exception du sixième cycle où on observe une légère augmentation du taux de gonflement par rapport aux cycles précédents. Ainsi l'effet des conditions initiales (la teneur en eau et le poids volumique sec) semble être éliminé à partir du troisième cycle, ce qui est en accord avec les observations faites par Yong et Warkentin, 1975 ; Day, 1995 et Tripathy et al., 2002.

Un tassement d'une amplitude de 0,4 mm est constaté lors de l'imbibition de l'échantillon Ech-IV au sixième cycle de gonflement (Figure 4.3.1, Figure 4.3.4), sur une durée de 2 minutes environ. Des phénomènes similaires sont constatés par Subba Rao et Satyadas (1987). Ces derniers ont noté que, sous des conditions physiques et environnementales particulières, des sols argileux secs présentent une phase d'effondrement immédiat en présence d'eau qui peut être liée à la microfissuration due à la destruction des liens formés au cours du séchage. Au delà du cinquième cycle, les échantillons se désintègrent, très facilement, en présence d'eau et perdent progressivement leur caractéristiques naturelles (structure, cimentation...).

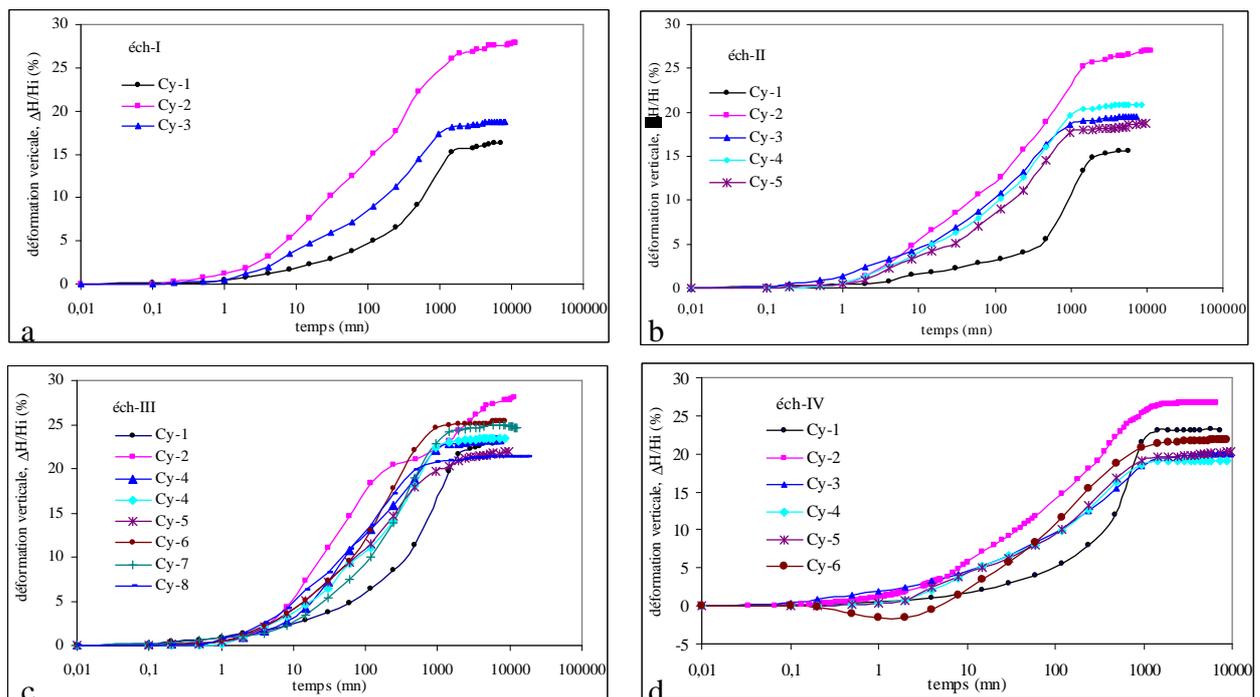


Figure 4.3.1 : Cinétique de gonflement de l'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) Ech-I, b) Ech-II, c) Ech-III, d) Ech-IV

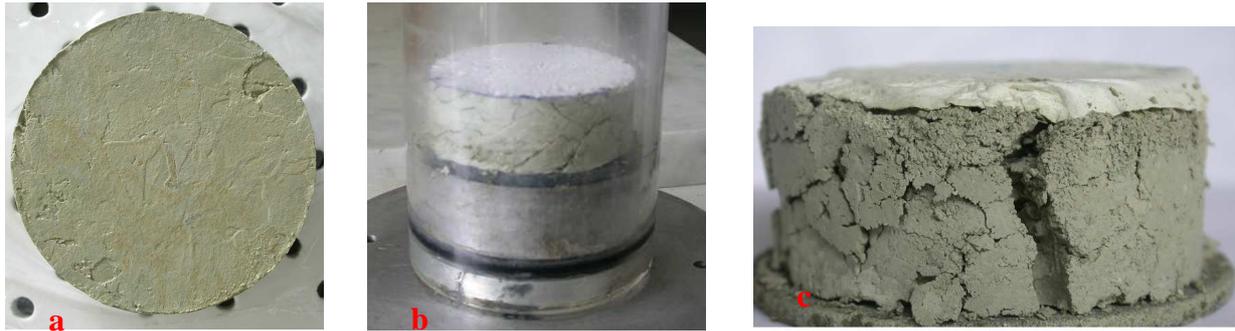


Figure 4.3.2 : Eprouvette d'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet : a) échantillon après la première phase de gonflement, b) après la première phase de séchage, apparition de fissuration, c) échantillon après la septième phase de séchage

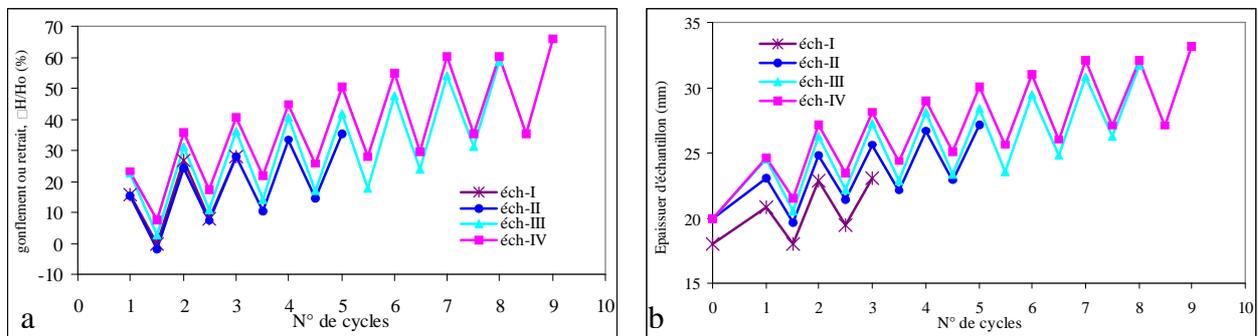


Figure 4.3.3 : Taux de gonflement et retrait de l'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) taux de gonflement et de retrait b) épaisseur des échantillons.

Pour tous les échantillons et pour chaque cycle, l'amplitude de gonflement est plus grande que l'amplitude de retrait (Figure 4.3.3 a). Dès le premier cycle, la hauteur des échantillons ne revient pas à la valeur d'origine (Figure 4.3.3 b) et le phénomène augmente au cours des cycles. Ainsi, après cinq cycles de gonflement-retrait, l'épaisseur de l'échantillon Ech-IV est de 30 % plus grande que son épaisseur de départ alors que la déformation mesurée pour chaque cycle reste approximativement constante dès le 3ème cycle (Figure 4.3.4 a). Les cycles successifs entraînent une augmentation progressive du volume qui se traduit par une augmentation de la capacité d'absorption d'eau : la teneur en eau moyenne de départ de 25 % passe à 39 % à la fin du 1er gonflement, puis à 43 %, 45 %, 47 %, et atteint 49 % à la fin du cinquième. La déformation engendrée par les cycles de retrait-gonflement n'est donc pas complètement réversible.

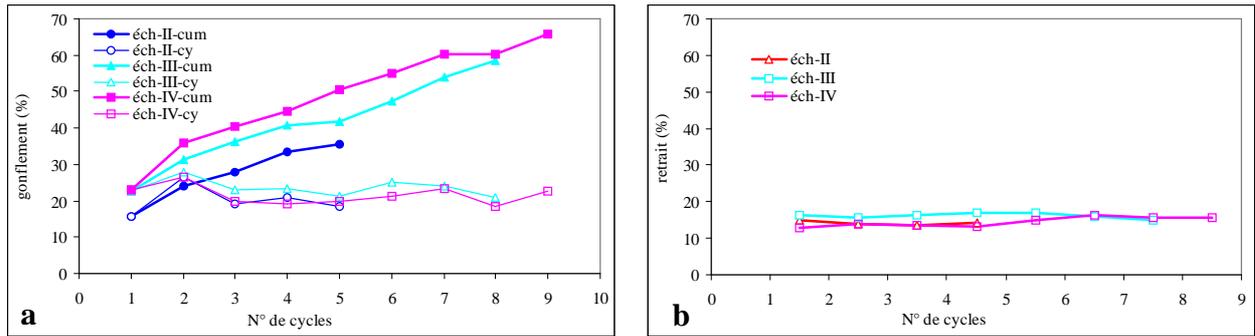


Figure 4.3.4 : Taux de gonflement et retrait de l'Argile verte de Romainville soumise alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet : a) Taux de gonflement cumulé et pour chaque cycle et b) taux de retrait pour chaque cycle

4.4 Les Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-1 et EMBA-01)

4.4.1 Les Marnes bleues d'Argenteuil EMBA-1

Quatre échantillons sont taillés à partir d'un même bloc afin d'analyser la microstructure au cours des essais cycliques (cf. chapitre 5). Ainsi, comme pour l'Argile verte, l'échantillon Ech-0 est arrêté à la fin de la première phase de gonflement, Ech-I à la fin de la quatrième phase de gonflement, et Ech-II à la fin de la sixième phase de gonflement. L'échantillon Ech-III est soumis à des cycles supplémentaires. Les paramètres géotechniques : teneur en eau initiale, densité sèche initiale, teneur en carbonates et pression verticale appliquée sont donnés dans le Tableau 4.4.1. Dans ce tableau, on note que les conditions initiales sont quasi identiques pour tous les échantillons.

Tableau 4.4.1 : Paramètres des échantillons EMBA-1 soumis à des essais cycliques

Paramètres	Ech-0	Ech-I	Ech-II	Ech-III
Teneur en eau initiale, $w(\%)$	23,4	23,2	23,7	23,4
Teneur en carbonates, (%)	59,6 à 61,5	59,6 à 61,5	59,6 à 61,5	59,6 à 61,5
Poids volumique sec, initial, $\gamma_d (kN.m^{-3})$	16,6	16,5	16,5	16,6
Pression verticale due au piston (kPa)	2	2	2	2

Sur la Figure 4.4.1 sont représentées les courbes de gonflement obtenues sur deux échantillons de EMBA-1 au cours de cycles successifs d'humectation/séchage. Comme pour les Argiles vertes, à partir du deuxième cycle le gonflement est sensiblement plus rapide, suggérant une perméabilité plus élevée ou l'existence de chemins préférentiels qui peuvent être liés à la fissuration (Figure 4.4.2).

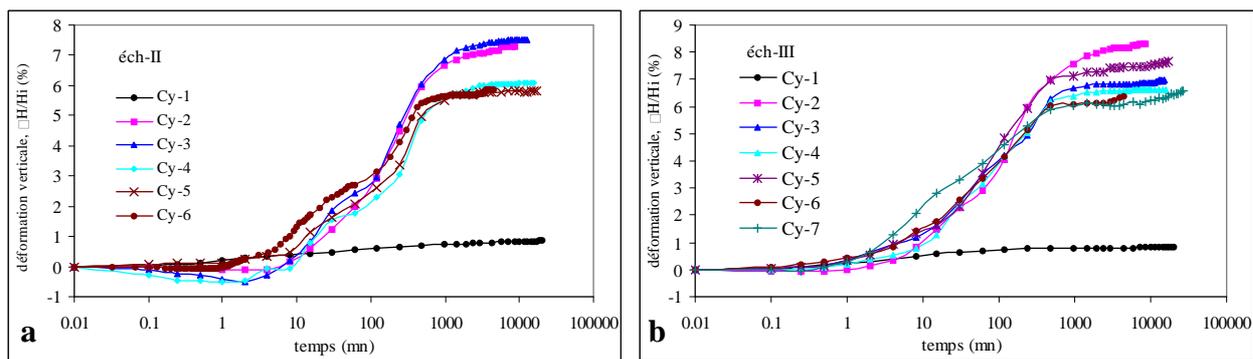


Figure 4.4.1 : Courbes de gonflement libre de la Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-1) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet a) échantillon Ech-II et b) échantillon Ech-III



Figure 4.4.2 : Eprouvettes de Marnes bleues d'Argenteuil soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) échantillon après la première phase de séchage b) après la quatrième phase de séchage, apparition de fissures, c) échantillon après la septième phase de séchage

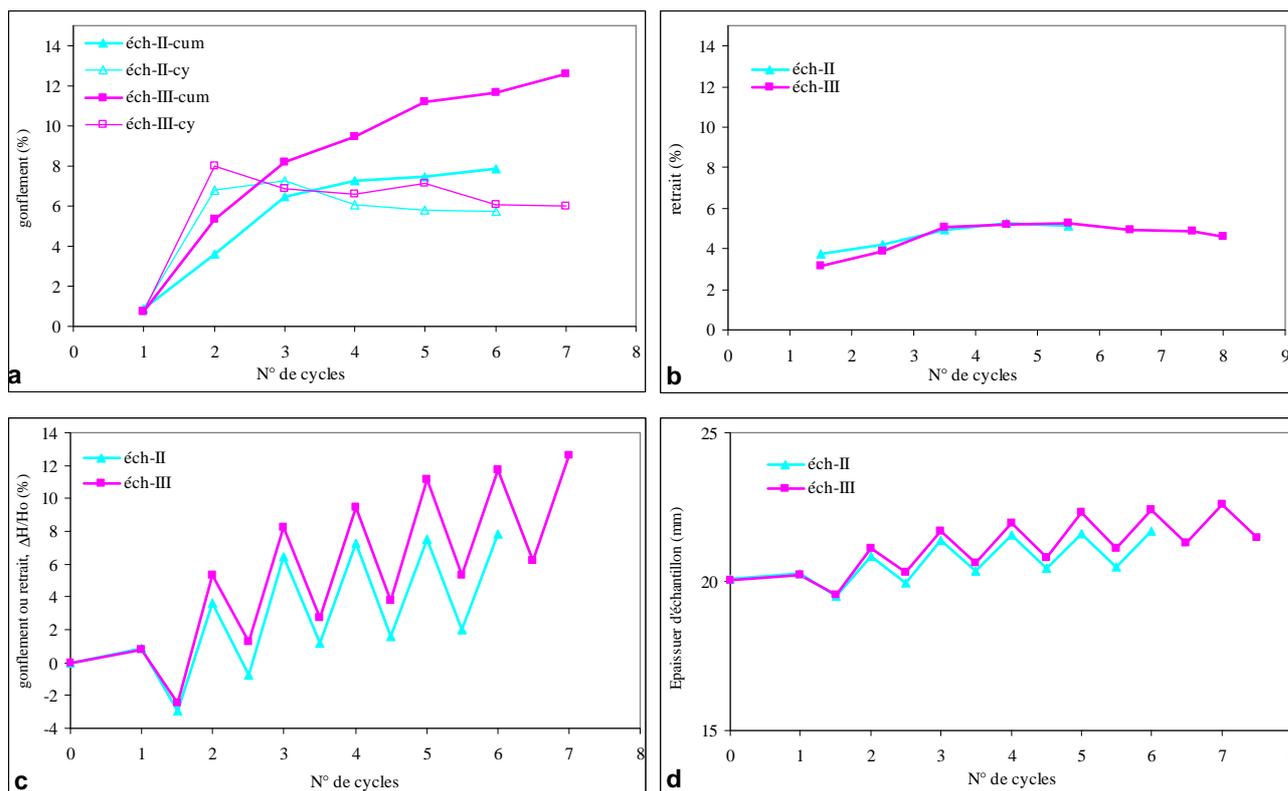


Figure 4.4.3 : Taux de gonflement et retrait des Marnes bleues d'Argenteuil soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet a) Taux de gonflement cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-II et Ech-III ; b) Taux de retrait cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-II et Ech-III ; c) taux de gonflement et de retrait pour chaque cycle ; d) épaisseur des échantillons

On note également que le taux de gonflement de EMBA-1 au premier cycle est très faible ($< 1,5\%$) (Figure 4.4.1 a). Comme nous l'avons exposé précédemment (cf. chapitre 3) ceci peut être lié à la semi-rigidité de la microstructure et à la présence d'un réseau de calcite très dense qui s'oppose au gonflement libre des argiles. Au cours des cycles suivants, on observe une augmentation du taux du gonflement. La déformation maximale est obtenue au cours du deuxième ou troisième cycle. L'augmentation des taux de gonflement ($< 1,5\%$ jusqu'à 6% , a) et de retrait ($< 4\%$ jusqu'à environ 6% , b, c) au cours des cycles successifs bien que faibles renforcent l'hypothèse de l'effet de structure du sol sur le gonflement. Ainsi la rupture des liaisons entre les minéraux et la déstructuration du sol facilitent l'accès de l'eau aux argiles et ainsi leur permet d'exprimer leurs propriétés de gonflement.

Un tassement d'une amplitude d'environ $0,1$ mm est constaté lors de l'imbibition de l'échantillon Ech-II au cours du troisième et du quatrième cycle de gonflement (Figure 4.4.1 a), sur une durée de 4 à 15 minutes environ, et celle du 3^{ème} cycle est suivie d'un gonflement dont l'amplitude se rapproche de celle du 2^{ème} cycle. Comme on l'a noté pour les Argiles vertes cette phase d'effondrement immédiat en présence d'eau peut être liée à la microfissuration due à la destruction des liens formés au cours du séchage.

Néanmoins la déformation amorce une stabilisation à partir du 3^{ème} cycle (a). Par ailleurs, après le deuxième cycle de gonflement, l'échantillon ne retrouve plus son épaisseur initiale à la fin de chaque séchage (d). Par conséquent une augmentation faible mais progressive du

volume du sol due à l'accumulation de gonflements résiduels est observée (d) entraînant une augmentation de la capacité d'absorption d'eau, ainsi la teneur en eau moyenne de départ de 23 % passe à 33 % à la fin du cinquième cycle.

4.4.1.1 Les Marnes bleues d'Argenteuil EMBA-01

De la même manière, des essais similaires ont été effectués sur trois échantillons de EMBA-01 (Ech-I, Ech-II et Ech-III). Les paramètres géotechniques : teneur en eau initiale, densité sèche initiale, teneur en carbonates et pression verticale appliquée sont donnés dans le Tableau 4.4.2. Dans ce tableau, on note tout d'abord que les conditions initiales ne sont pas identiques pour tous les échantillons. Même si tous les échantillons sont taillés à partir d'un même bloc, l'échantillon Ech-II possède un pourcentage plus élevé de carbonates et une teneur en eau initiale moins élevée que les deux autres échantillons. Par ailleurs, les échantillons Ech-I et Ech-III présentent un litage prononcé avec des intercalations plus argileuses (Figure 4.4.4). L'échantillon Ech-II est l'échantillon le plus homogène.

Tableau 4.4.2 : Paramètres des échantillons EMBA-01 soumis à des essais cycliques

<i>Paramètres</i>	<i>Ech-I</i>	<i>Ech-II</i>	<i>Ech-III</i>
Teneur en eau initiale, $w(\%)$	31,5	27,5	31,8
Teneur en carbonate, (%)	23,7	34	23,3
Poids volumique sec, initial, $\gamma_d (kN.m^{-3})$	14,6	15,5	14,9
Pression verticale due au piston (kPa)	2	2	2



Figure 4.4.4 : Eprouvettes de Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-01) après une première phase d'imbibition totale et de séchage complet : a) Ech-I, b) Ech-II, c) éch-III. Les cercles montrent les lits de matériau plus argileux

Les cinétiques de gonflement des échantillons sont représentées sur la Figure 4.4.5. On observe le même phénomène que dans les cas précédents : à partir du deuxième cycle le

gonflement est plus rapide et sa vitesse augmente au cours de cycles, suggérant une perméabilité plus élevée liée à l'ouverture progressive des fissures de retrait au cours du séchage. Sur la Figure 4.4.4 a et c on observe l'ouverture de fissures de retrait suivant des filets de matière argileuse.

La Figure 4.4.6 représente les taux de gonflement et de retrait des différents cycles de sollicitations hydriques. La déformation maximale se produit au deuxième cycle. Dans le premier cycle, le taux de gonflement des échantillons Ech-I et Ech-II qui ont des conditions initiales similaires est quasi identique (15,6 %). Malgré une teneur en eau faible et une densité sèche plus élevée que les deux autres, le taux de gonflement de l'échantillon Ech-II est au-dessous de celui des deux autres (9 %). Ainsi, le taux de gonflement de l'échantillon Ech-II est fortement influencé par la présence de carbonates qui contribuent à rigidifier la microstructure du sol.

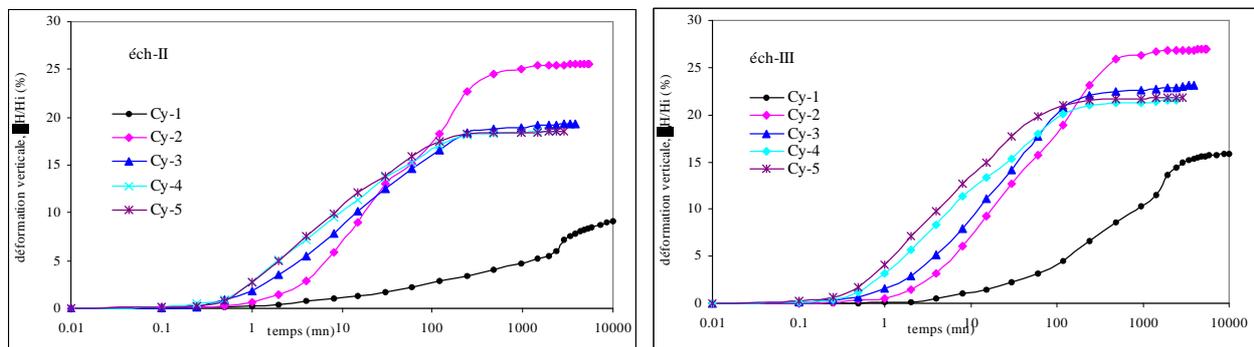


Figure 4.4.5 : Courbes de gonflement libre de la Marne bleue d'Argenteuil (EMBA-01) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet a) Ech-II, b) Ech-III

A partir du troisième cycle, le taux de gonflement pour chaque cycle semble se stabiliser, 18,5 % pour l'Ech-II et 21,5 % pour l'Ech-III (Figure 4.4.6 a). Pour tous les échantillons et pour chaque cycle, l'amplitude de gonflement est plus grande que l'amplitude de retrait (Figure 4.4.6 b et c). Après la première phase de gonflement, le sol ne retrouve plus son épaisseur initiale à la fin de chaque séchage (Figure 4.4.6 d). Par conséquent une augmentation progressive du volume du sol due à l'accumulation de gonflements résiduels est observée (Figure 4.4.6 c). On constate aussi une augmentation de la capacité d'absorption d'eau : ainsi la teneur en eau moyenne de départ de 31,6 % pour Ech-I et Ech-III passe à 41 % à la fin du premier cycle de gonflement et à 58 % à la fin du cinquième cycle de gonflement.

Le pourcentage de carbonates de EMBA-01 (24 à 34 %) est compris entre celui des Argiles vertes (14 à 18 %) et celui de EMBA-1 (58 à 62 %), le taux de gonflement enregistré pour EMBA-01 au cours des cycles successifs est aussi compris entre celui des deux autres formations. Or la nature des argiles présentes dans les trois formations est globalement identique, seul le pourcentage de carbonates varie de façon sensible.

On peut donc en déduire que plus le taux de carbonates est important moins les argiles sont mobilisables et libres d'exprimer leurs propriétés de gonflement au sein de la matrice carbonatée. Les carbonates jouent donc un rôle de ciment qui confère à la structure une certaine rigidité d'autant plus grande que la présence de ces carbonates est importante.

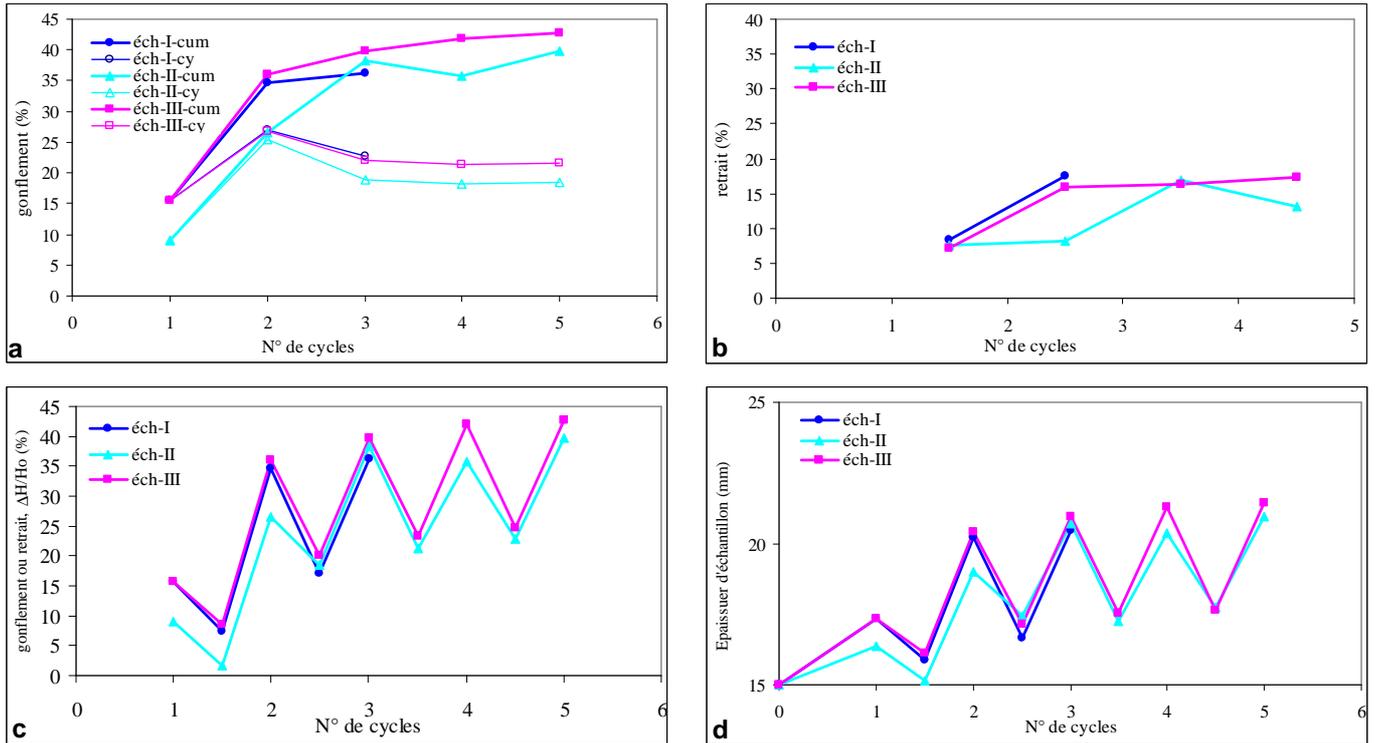


Figure 4.4.6 : Taux de gonflement et retrait de Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-01) soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet : a) taux de gonflement cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-I, Ech-II et Ech-III ; b) taux de retrait des échantillons pour chaque cycle ; c) taux de gonflement et de retrait ; d) épaisseur des échantillons

4.4.1.2 Les Argiles vertes de Romainville remaniées/colluvions (EAVR-C)

Sur la Figure 4.4.7 sont représentées les courbes de gonflement obtenues sur deux échantillons de EAVR-C au cours des cycles successifs d'humectation/séchage. Les paramètres géotechniques des échantillons testés sont donnés dans le Tableau 4.3.1. Comme pour les Argiles vertes, à partir du deuxième cycle le gonflement est sensiblement plus rapide lié à l'existence de chemins préférentiels de transfert d'humidité qui peut être due à la fissuration.

Tableau 4.4.3 : Paramètres des échantillons EAVR-C soumis à des essais cycliques

Paramètres	éch-I	éch-II
Teneur en eau initiale, $w(\%)$	27,9	27,8
Teneur en carbonates, (%)	12,2	12,2
Poids volumique sec, initial, $\gamma_d (kN.m^{-3})$	15,4	15,5
Pression verticale due au piston (kPa)	2	2

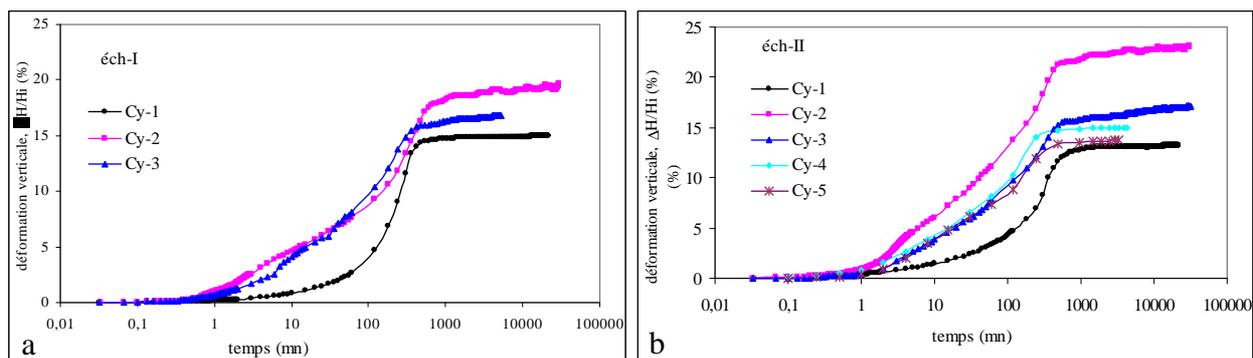


Figure 4.4.7 : Courbes de gonflement libre des Argiles vertes de Romainville remaniées/colluvions (EAVR-C) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet a) Ech-I b) Ech-II

La Figure 4.4.8 représente les taux de gonflement et de retrait des différents cycles de sollicitations hydriques. Les mêmes remarques que pour EAVR-0 peuvent être formulées. La déformation maximale se produit au deuxième cycle et à partir du troisième cycle, le taux de gonflement semble se stabiliser (environ 14,5 %). Pour les deux échantillons et pour chaque cycle, l'amplitude de gonflement est plus grande que l'amplitude de retrait (Figure 4.4.8 b et c), par conséquent une augmentation progressive du volume du sol due à l'accumulation de gonflements résiduels est constatée (Figure 4.4.8 d). Néanmoins cette augmentation progressive du volume est moins élevée que celle de EAVR-0.

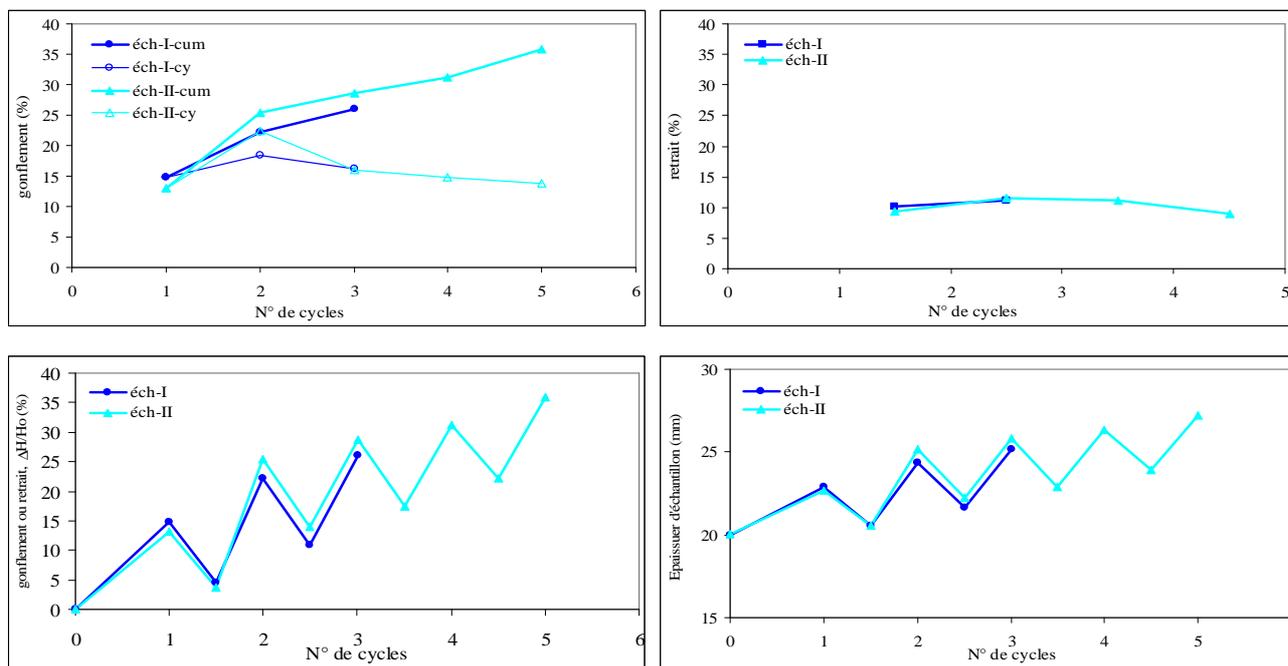


Figure 4.4.8 : Taux de gonflement et retrait de l'Argile verte de Romainville remaniée/colluvions (EAVR-C) au cours des cycles successifs imbibition-séchage complet : a) taux de gonflement cumulé ($\Delta H/H_0$) et $\Delta H/H_i$ pour les échantillons Ech-I et Ech-III; b) taux de retrait des échantillons pour chaque cycle c) taux de gonflement et de retrait d) épaisseur des échantillons

4.5 Conclusion

Les résultats exposés dans ce chapitre montrent que la fissuration de l'échantillon au premier séchage, en augmentant la perméabilité du sol, influence la cinétique de gonflement lors du cycle suivant. Pour chaque sollicitation cyclique, une stabilisation des déformations verticales s'amorce à partir du troisième cycle. Cependant, l'ensemble des échantillons présente une augmentation progressive du volume due à l'accumulation des gonflements résiduels témoignant ainsi d'une irréversibilité partielle du phénomène de retrait-gonflement. La microstructure des sols, en particulier la présence ou non de liaisons ou de cimentation, joue un rôle important dans les variations de volume observées au cours des cycles. En particulier, pour les Marnes bleues d'Argenteuil, il apparaît que la clé de la compréhension des propriétés de gonflement réside dans la structure du matériau. Dans le cas où la phase carbonatée empêche l'argile d'exprimer ses propriétés, on constate que le potentiel de gonflement de ce matériau est faible même après des sollicitations hydriques cycliques.

Chapitre 5 Aspects structuraux et microstructuraux du retrait-gonflement des sols argileux

Ce chapitre présente le deuxième ensemble de résultats tirés de l'étude expérimentale, de la fissuration au cours de la dessiccation et de l'étude texturale/microstructurale réalisé en s'appuyant sur l'observation microscopique au microscope électronique à balayage et sur la porosimétrie au mercure.

Dans la première partie de ce chapitre, les dispositifs expérimentaux et les principaux résultats obtenus sur la fissuration des sols intacts et remaniés seront présentés. La deuxième partie sera consacrée aux procédures expérimentales et aux résultats de l'étude microstructurale. Nous insisterons sur les relations entre la déformation macroscopique des sols étudiés et l'évolution de leur texture /microstructure. Cette partie sera donc consacrée à l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) et à l'analyse des résultats de l'étude microstructurale par porosimétrie au mercure.

5.1 Fissuration du sol due à la dessiccation

Le séchage d'un sol riche en argile gonflante provoque une réorganisation de ses constituants. Il en résulte un retrait, se manifestant par une modification de la porosité du sol et notamment par l'apparition de fissures et microfissures. En effet, les fissures que l'on observe à la surface d'un sol ayant subi des cycles de dessiccation et d'humidification sont dues en général à la fois au retrait et au gonflement (Blight, 1997). L'étude comprend des expériences de dessiccation sur des échantillons intacts et remaniés. L'objectif général de cette étude est d'apporter une contribution à la compréhension, à la caractérisation et à l'identification des variables qui contrôlent le processus de la fissuration, à l'échelle macroscopique, lors de la dessiccation des sols argileux.

5.1.1 *Retrait et fissuration d'échantillons intacts*

5.1.1.1 Matériaux et méthodes

Des échantillons d'EAVR-0 et d'EMBA-1 sont taillés (diamètre 70 mm et épaisseur 24 mm) et séchés à l'air libre dans l'environnement du laboratoire ($T = 22 \pm 1^\circ\text{C}$, et humidité relative $40 \pm 5\%$). Après stabilisation de la teneur en eau, les échantillons sont placés dans des dessiccateurs en verre en atmosphère saturée en vapeur d'eau. Plusieurs cycles ont été réalisés sur les Argiles vertes taillés perpendiculairement et parallèlement au plan du litage. Le retrait latéral et l'évolution au cours du temps de la fissuration du sol sont suivis et décrit à partir de photographies de la surface de l'échantillon prises à intervalle régulier avec un appareil numérique. Les étapes successives de traitement sont :

- La détection et le traçage des fissures de façon visuelle ;
- Le passage d'une image couleur à une image en niveaux de gris en utilisant la luminance: les fissures apparaissent foncées ;
- La transformation en mode binaire (noir et blanc).

Le réseau de fissures est ensuite décrit par le pourcentage de surface occupé par les fissures (pixels) par unité de surface. Le retrait latéral est décrit par le pourcentage de

surface occupé entre le cylindre de sol et l'anneau métallique. Tout au long du séchage, on suit l'humidité du sol par pesée du sol.

5.1.1.2 Résultats

Sur la Figure 5.1.1a sont représentées les courbes de retrait de deux échantillons d'Argiles vertes de Romainville de l'Est taillés perpendiculairement et parallèlement au plan du litage. L'échantillon dont la surface de base est perpendiculaire au plan du litage montre un taux de retrait supérieur à celui observé pour l'échantillon dont la surface de base est parallèle au plan du litage mais présente une limite de retrait assez proche (13 % vs 15 %). Cette différence de comportement pourrait résulter de l'anisotropie d'arrangement des particules argileuses. La Figure 5.1.1b montre également une différence entre la déformation verticale, mesurée au moyen d'un comparateur de déplacement, et la déformation latérale déduite à partir d'analyse d'images. Ces résultats montrent que le retrait de l'Argile verte de Romainville n'est pas isotrope.

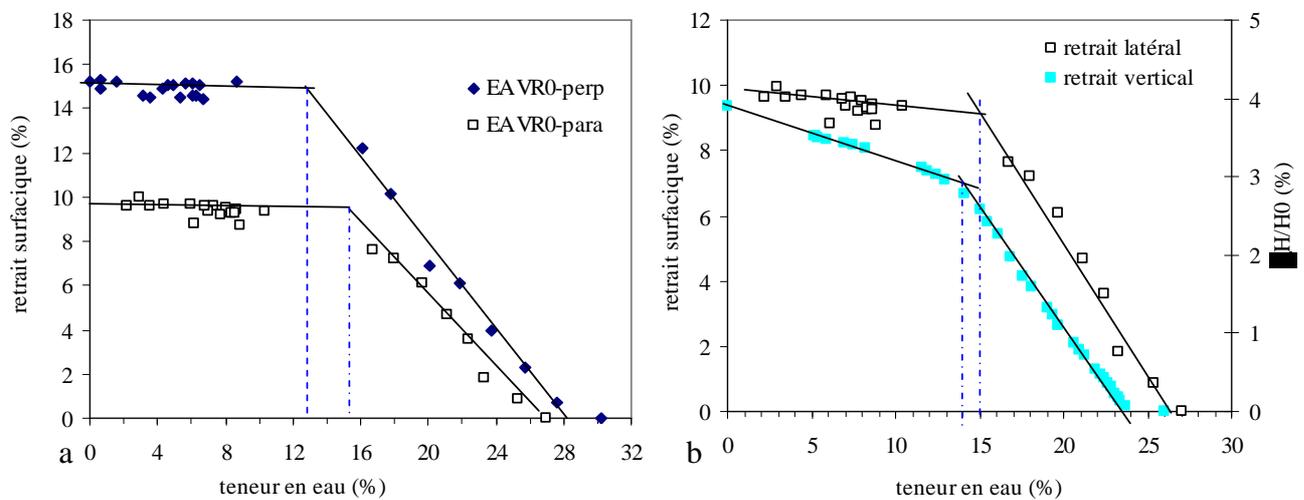


Figure 5.1.1 : a) Evolution du retrait surfacique en fonction de la teneur en eau pour les échantillons d'EAVR-0 perpendiculaire et parallèle au plan du litage, b) Comparaison entre le retrait surfacique et le retrait vertical

Les cycles de séchage complet-humectation jusqu'à une teneur en eau correspondant à la limite de retrait (l'humidification sous atmosphère saturée ne permet pas de dépasser la teneur en eau correspondant à la limite de retrait du sol), réalisés sur des échantillons intacts d'EAVR-0 révèlent l'existence d'un réseau de fissures (Figure 5.1.2).

A l'état naturel, aucune fissure n'est décelable à l'observation. Dès le premier séchage, entre l'état naturel et la limite de retrait, le retrait provoque la création d'une porosité bidimensionnelle. Cette porosité s'organise en un réseau de fissures fines, d'épaisseur inférieure à 1mm, dont le nombre et la surface par unité de surface d'échantillon augmentent régulièrement lorsque le séchage progresse au dessous de la limite de retrait (Figure 5.1.3). Par endroit, on observe des fissures préexistantes s'élargissant légèrement alors que certaines des fissures voisines se referment.

Cette fissuration très fine et diffuse évolue très lentement au cours des cycles successifs tant que la teneur en eau d'hydratation reste inférieure à la limite de retrait. Bien que la contribution des fissures au phénomène de retrait ne soit pas significative, elle augmente très légèrement au cours des cycles, indiquant une détérioration du sol (Figure 5.1.3). Pour des teneurs en eau supérieures à la limite de retrait son évolution est très rapide et suit les plans de fissures initiés au cours du premier cycle. Le gonflement entraîne alors une destruction par

division de l'échantillon suivant ces plans (Figure 5.1.2i), la destruction totale de l'échantillon étant empêchée par l'anneau métallique de serrage.

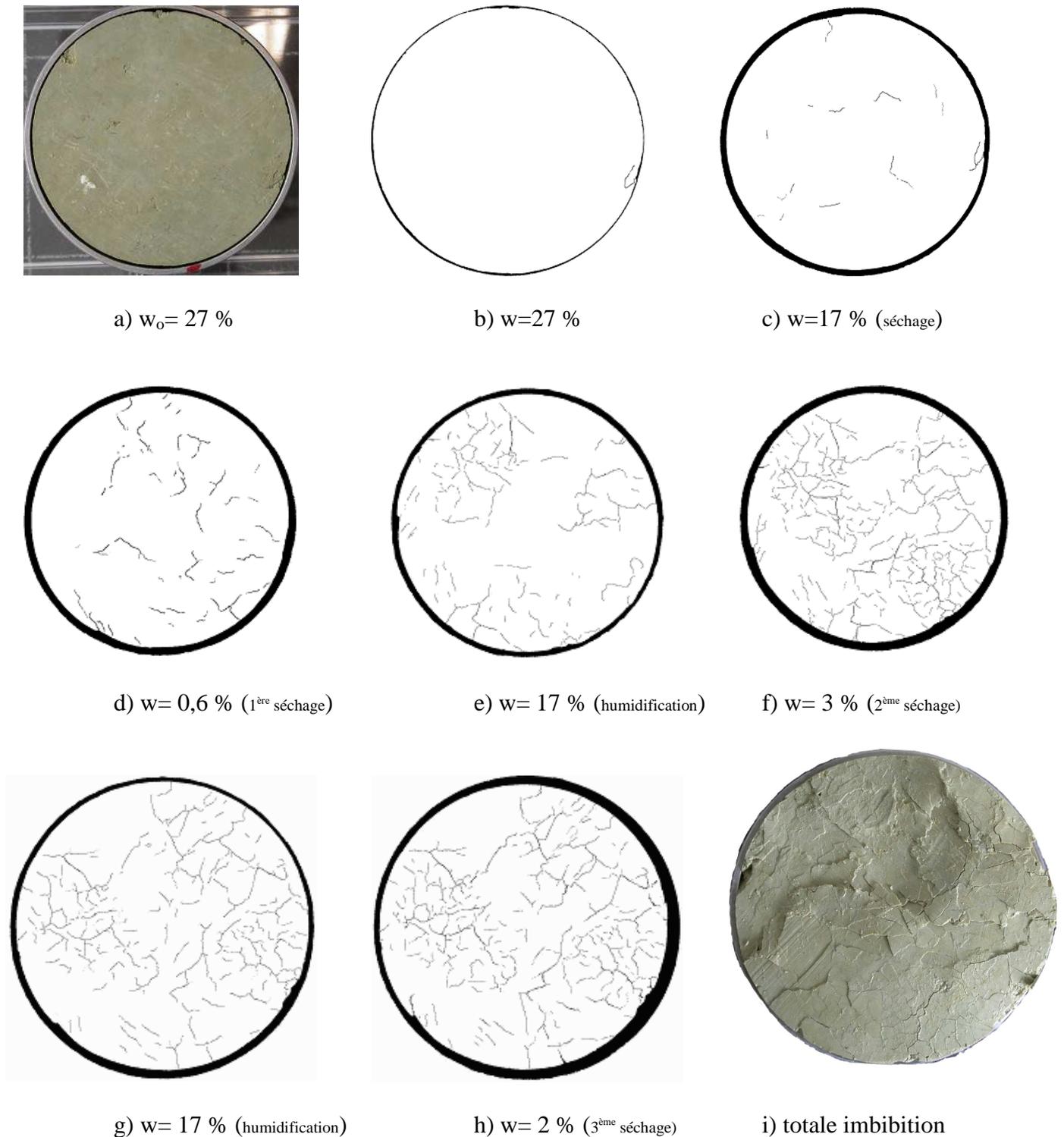


Figure 5.1.2 : Evolution du réseau de fissures à la surface d'un échantillon d'Argiles vertes de Romainville au cours de la dessiccation-humidification : a) état naturel, b) traces des fissures de a), c) traces après séchage jusqu'à $w = 17 \%$ d) traces après le 1er séchage complet, e) traces après la 1ère humidification, f) traces après le 2ème séchage, g) après la 2ème humidification, h) après 3 cycles séchage-humidification, i) ouvertures des fissures au cours de l'imbibition ($w > w_R$)

Ce réseau de fissures pourrait correspondre à d'anciennes surfaces de cisaillement ou « slickensides » qui témoignent de remaniements durant les temps géologiques et dont l'origine peut être due à des phénomènes de retrait-gonflement après les phases d'émersion des dépôts sédimentaires indurés. Ces surfaces se sont en partie cicatrisées mais constituent des plans de faiblesse qui sont remobilisés lors de sollicitations hydriques successives.

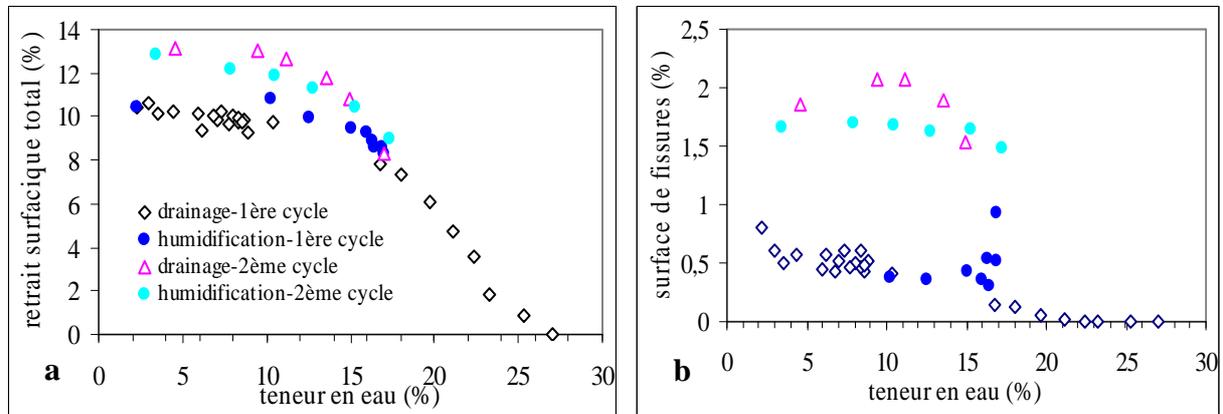


Figure 5.1.3 : Evolution du retrait surfacique total (a) et du réseau de fissures (b) à la surface du sol en fonction de la teneur en eau pondérale d'un échantillon d'Argile verte de Romainville au cours de la dessiccation – humidification

Les résultats obtenus sur les échantillons intacts de la Marne bleue d'Argenteuil mettent en évidence de faibles variations de volume et l'absence de fissuration au cours des cycles séchage-imbibition, quelque soit la teneur en eau finale (inférieure ou supérieure à la limite de retrait), seules quelques écailles dues à un éclatement du matériau peuvent être observées (Figure 5.1.4).

Les études microstructurales menées sur ce matériau conduisent à penser que la présence de carbonates en quantité importante forme un squelette semi-rigide qui contrarie la déformation du matériau (cf. paragraphe 5.2).



Figure 5.1.4 : Echantillon intact de Marne bleue d'Argenteuil : a) après séchage, b) après imbibition ($w > w_R$)

5.1.2 *Retrait et fissuration d'échantillons remaniés*

Dans les paragraphes qui suivent on présente les résultats d'une étude expérimentale de dessiccation menée sur des échantillons de sol remaniés avec un contrôle, des conditions aux limites et de séchage. L'objectif principal de cette expérience a été de comprendre comment les paramètres déformation / teneur en eau / degré de saturation / succion évoluent et mènent éventuellement à la fissuration et comment cette dernière évolue dans le temps et dans l'espace lors de la dessiccation, avec prise en compte des variations d'échelle.

5.1.2.1 Préparation d'échantillon et conditions de séchage

Les échantillons remaniés sont préparés à une teneur en eau d'environ 1,5 fois la limite de liquidité avec de l'eau à la température ambiante du laboratoire. Le sol, saturé et sous forme de boue, est mis en place à l'aide d'une table vibrante dans des moules en PVC ou en plexiglas ou en métal huilés sur leurs faces intérieures pour avoir un retrait libre, ou du moins le facilité. Les éprouvettes qui présentaient, après vibration, une surface avec des angles et des bords très nets, sans débordement du sol, sont soumises au séchage immédiatement après fabrication, dans les conditions prévues (à l'air libre ou dans une étuve climatisée).

Dans le cas de dessiccation libre, le séchage du sol se fait sur une surface de base lisse (support en téflon traité avec une substance hydrophobe) afin de minimiser la friction mécanique lors du retrait. Et dans le cas de retrait empêché, le séchage du sol se fait sur une surface rugueuse (des aspérités de 0,45 cm de hauteur et 0,5 cm de largeur espacées de 0,5 cm en 2D) (Figure 5.1.5)

Les expériences ont été conduites au laboratoire où malheureusement ni la température ni l'humidité ambiantes ne pouvaient être contrôlées. Néanmoins les valeurs moyennes enregistrées pour la température et l'humidité relative ambiantes ont été respectivement de $22 \pm 1^\circ\text{C}$ et $40 \pm 5 \%$. En plus, quelques échantillons sont séchés dans une étuve climatisée à 22 ou $45 \pm 0,2^\circ\text{C}$ et $40 \pm 1 \%$ respectivement pour la température et l'humidité relative.

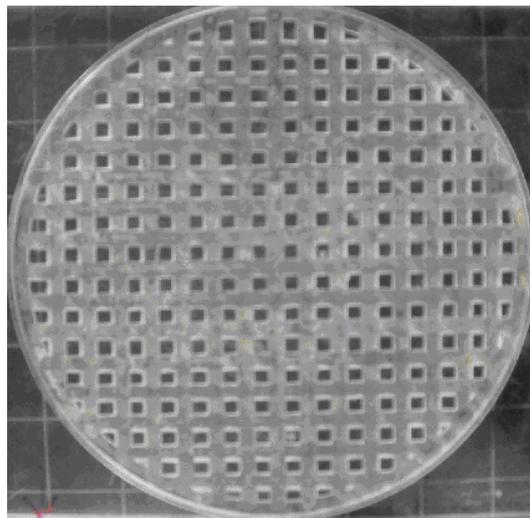


Figure 5.1.5 : Support rugueux en plexiglas

Le retrait latéral et l'évolution au cours du temps de la fissuration du sol sont suivis et décrits à partir de photographies de la surface de l'échantillon prises à intervalles réguliers avec un appareil numérique et l'analyse d'images est faite comme décrit précédemment (Paragraphe 5.1.1.1). Tout au long du séchage, l'humidité du sol est suivie par pesée (Figure 5.1.6). La

température et l'humidité relative ambiantes ont été enregistrées manuellement à intervalles réguliers lorsque le séchage se faisait dans l'environnement du laboratoire.



Figure 5.1.6 : Essais de dessiccation

5.1.2.2 Résultats

Un tableau synthétique des conditions initiales (dimensions, formes des échantillons) ainsi que la nature de la surface de base (lisse ou rugueuse) pour les essais de séchage et d'imbibition sur échantillons remaniés réalisés, sont données dans le Tableau 5.1.1.

Tableau 5.1.1 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes de matériau remanié (oui et non signalent si la fissuration est observée)

Echantillons	Dimension	Epaisseur (mm)					
		5	10	15	20	24	30
EAVR-0	LxW (ou Diamètre) (mm)						
	173 X 113		non				
	114 X 84	non	non	non			
	84 X 54		non				
	D=70					non	
	D=88	non					
	D=185		non	non	non		
D=185 (base rugueuse)				oui		non	
EMBA-1	173 X 113		oui				
	114 X 84	oui	non	non			
	84 X 54		non				
	D=70					non	
	D=88	oui					
	D=185		oui	non	non		
	D=185 (base rugueuse)				oui		

La Figure 5.1.7 montre les variations de teneur en eau en fonctions du temps (ou la cinétique de séchage) d'échantillons d'Argiles vertes de Romainville et de Marnes bleues d'Argenteuil de dimensions et teneurs en eau initiales différentes sous des conditions de séchage différents. La teneur en eau diminue linéairement au cours de séchage dans la première partie, puis se stabilise. On observe que la température influence de façon conséquente la vitesse de perte d'eau. Les pentes des courbes de perte d'eau augmentent avec la température et le temps de stabilisation diminue avec la température.

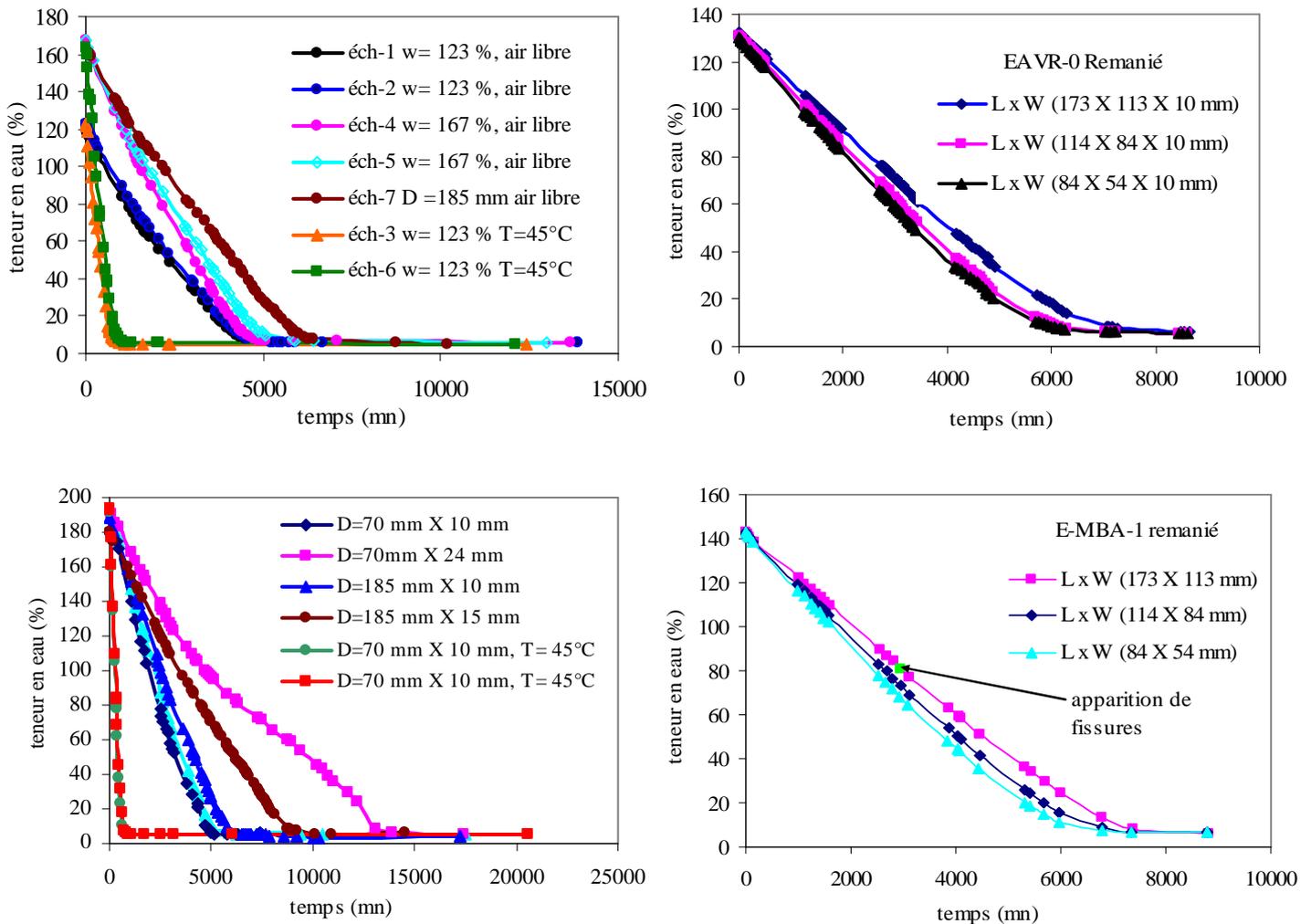


Figure 5.1.7 : Variation de teneur en eau en fonction du temps : des Argiles vertes de Romainville, (a) échantillons cylindriques (D=10 mm, e=10 mm), (b) échantillons rectangulaires ; des Marnes bleues d'Argenteuil, (c) échantillons cylindriques (w =192 ±1 %), (d) échantillons rectangulaires

La taille des échantillons influence la cinétique de séchage : plus la taille de l'échantillon est importante, plus la pente de la courbe de perte d'eau diminue, et donc plus la durée de séchage augmente. A la fin du séchage, la teneur en eau finale est comprise entre 5,3 % et 7,4 %. Les valeurs faibles correspondent aux échantillons séchés à 45 °C et les valeurs maximales pour les échantillons de diamètre élevé (D=185 mm). La Figure 5.1.7 c montre des courbes similaires pour les Marnes bleues d'Argenteuil.

Pour tous les échantillons, le séchage de la surface n'a pas été uniforme car, durant un certain laps de temps, on distinguait des zones déjà sèches et des zones encore humides. Dans tous les cas, la progression du séchage surfacique a commencé sur les bords puis s'est propagée vers le centre. Ainsi, il existe des gradients de teneur en eau au sein de l'échantillon.

L'analyse du Tableau 5.1.1 met en évidence qu'à l'exception d'un échantillon, tous les échantillons d'EAVR-0 présentaient un retrait plastique sans fissuration. Le seul échantillon d'Argiles vertes de Romainville remaniée qui présente des signes de fissuration a été mis en place sur une surface rugueuse (Figure 5.1.8). Sa hauteur initiale est de 20 mm. Le

phénomène de fissuration est localisé, il ne s'étend pas à l'ensemble de l'éprouvette. Un essai dans des conditions identiques, mais avec un échantillon de hauteur 30 mm ne présente pas de fissuration. Après examen de la base de l'échantillon de 30 mm, il s'avère que sous l'effet des forces de rétraction l'échantillon s'est cisailé au cours du séchage laissant une tranche de matériau sur la surface rugueuse. Cette dernière a servi de surface de glissement à la tranche supérieure qui s'est alors rétractée sans se fissurer.



Figure 5.1.8 : Séchage EAVR-0 remanié D= 185 mm, e= 20 mm

La comparaison des essais réalisés sur l'Argile verte de Romainville met en évidence l'importance de la dimension (la hauteur) de matériau mise en jeu au cours du séchage mais aussi de la nature du support de base. Les particules argileuses qui composent en majorité ce matériau servent de lubrifiant au mouvement de rétraction (tangential à la surface) et lorsque la surface présente des aspérités les forces dues aux tensions interfaciales (responsables de la rétraction) sont telles, qu'à partir d'une certaine hauteur de matériau, elles se comportent comme des forces de cisaillement et arrivent à vaincre les forces de frottement exercées par la surface rugueuse.

Le comportement des Marnes bleues d'Argenteuil est différent. La plupart des échantillons sur surface lisse, dont la hauteur est inférieure à 10 mm, se fissurent (Figure 5.1.9 a, b et c), il en est de même de l'échantillon de 20 mm sur une surface rugueuse (Figure 5.1.9 d). Contrairement à l'Argile verte de Romainville, cette fissuration se répartit sur toute la surface en formant des polyèdres plus ou moins réguliers.



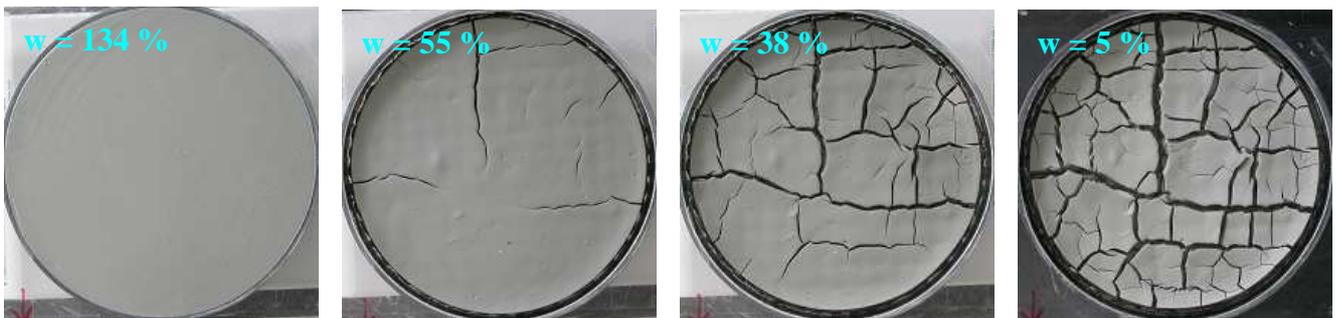
a) D = 185 mm, e = 10 mm sur surface lisse



b) D = 88 mm, e = 5 mm sur surface lisse



c) 114 mm x 84 mm x 5 mm sur surface lisse



d) D = 185 mm, e = 20 mm sur surface rugueuse

Figure 5.1.9 : Evolution du réseau de fissures sur la surface des échantillons de Marne bleues d'Argenteuil remaniée

La nature des minéraux qui entrent dans la composition de ces deux formations est identique, seule la proportion en carbonates varie, elle passe de moins de 12 % pour EAVR-0 à plus de 45 % pour EMBA-1. Bien que le squelette semi-rigide, formé par ces carbonates mis en évidence dans les échantillons intacts, soit détruit dans les échantillons remaniés, la présence de carbonates parfois sous forme de grains de quelques microns joue un rôle résistant qui va

s'ajouter aux forces de frottement exercées par le support et s'opposer ainsi au rôle lubrificateur exercé par les argiles. Le matériau va alors sécher en se fissurant.

Comme pour l'Argile verte de Romainville, les essais réalisés sur la Marne bleue d'Argenteuil mettent aussi en évidence l'importance de la dimension (hauteur et/ou longueur) de matériau mis en jeu au cours du séchage. Les échantillons de hauteur de 10 mm et 15 mm et de surface de 96 cm^2 (114 X 84 mm) n'ont pas fissuré alors que celui qui a une hauteur de 5 mm s'est fissuré.



Figure 5.1.10 : EAVR-0 remanié, a) $w_0 = 112 \%$, b) après séchage, c) imbibition $w > w_R$

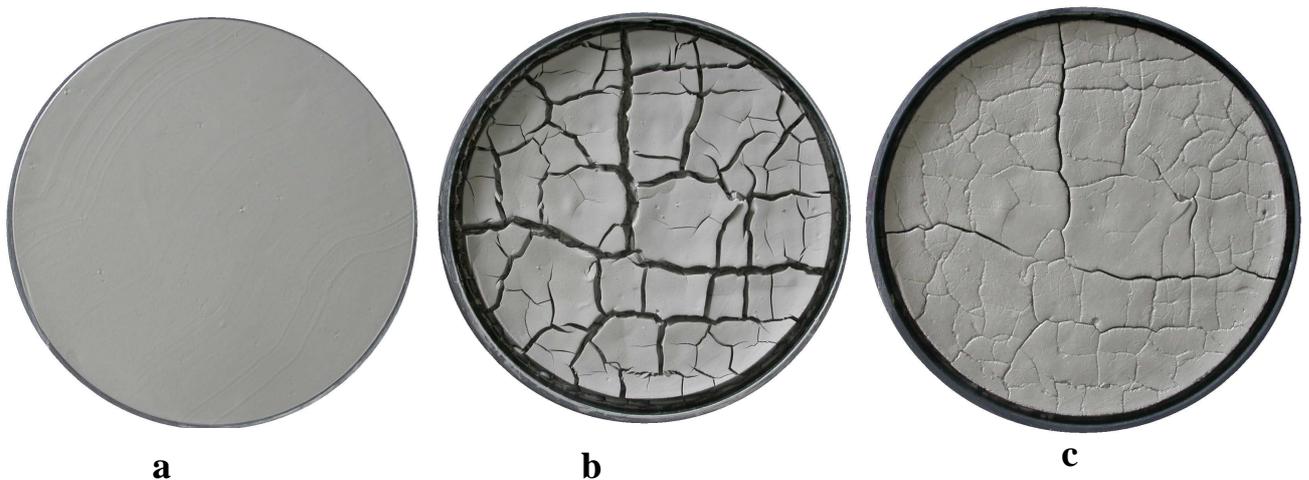


Figure 5.1.11 : EMBA-1 remanié, a) $w_0 = 134 \%$, b) après séchage, c) imbibition $w > w_R$

Au cours de l'imbibition, le comportement de ces deux formations est aussi très différent. Pour la Marne bleue, le gonflement accompagnant l'imbibition entraîne une cicatrisation des faces des polyèdres de rétraction permettant à l'éprouvette de retrouver, en apparence, un état proche de l'état initial (Figure 5.1.11 c). A l'inverse, l'imbibition de l'Argile verte menée à partir d'un échantillon non fissuré, se traduit par une destruction de l'éprouvette (Figure 5.1.10 c).

5.1.2.3 Caractéristiques des réseaux de fissures de l'échantillon EMBA-1 et dynamique d'évolution

L'évolution du réseau de fissures des échantillons de EMBA-1 au cours de séchage est présentée sur la Figure 5.1.9 et le nombre de fissures et les angles d'intersection estimés sont donnés sur le Tableau 5.1.2. Sur la Figure 5.1.12 sont présentées les caractéristiques des fissures de cet échantillon de dimensions $D=185$ mm, $e= 20$ mm, séché sur une surface rugueuse. Sur tous les échantillons fissurés, on observe un réseau de fissures bidimensionnelles. Les plaques délimitées par les fissures sont de forme polyédrique. Une différence est notée entre les fissures développées sur échantillon séchés sur surface lisse ou rugueuse. Les fissures développées sur échantillons à surface lisse sont moins nombreuses (9 à 10) mais avec une ouverture relativement grande (3 à 6 mm). L'angle d'intersection n'a pas été systématiquement mesuré, mais tend généralement vers 120° .

Les fissures développées sur échantillons à surface rugueuse sont nombreuses (> 105) mais relativement fines (< 1 mm à 5 mm). La longueur totale de fissures évolue d'environ 0,4 à 11 cm / 10 cm^2 au maximum de leur développement. L'angle d'intersection tend généralement vers 90° et quelquefois vers 120° (Figure 5.1.13 b et d, points encerclés). L'aire moyenne des plaques formées varie également. On note en moyenne 3 à 4 intersections par plaque entre les fissures formant la plaque et les fissures transversales.

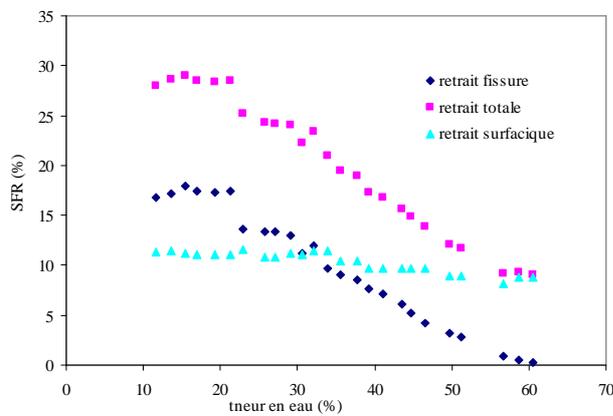
Les fissures se forment successivement au cours du séchage, et les fissures existantes influencent les suivantes. Cette interaction se fait via le champ des contraintes mécaniques (Bohn, 2006). En l'absence de fissures, le champ de contraintes est homogène. Les fissures existantes permettent le relâchement des composantes des contraintes qui leur sont perpendiculaires, la composante parallèle n'étant que peu affectée. Quand une nouvelle fissure entre dans le voisinage d'une ancienne, elle commence à être influencée par cette dernière. La nouvelle fissure se propage dans la direction qui lui permet le plus important relâchement de contraintes et donc elle change d'orientation et rejoint l'ancienne à angle droit (Figure 5.1.13 c, fissures encerclées).

C'est à cause des composantes parallèles qui ne se relâchent pas que chaque fissure se connecte par ses deux extrémités aux fissures précédentes et qu'ainsi la surface se divise en cellules. Et puisque les nouvelles fissures se connectent par des angles droits aux anciennes sans les perturber, la continuité des anciennes fissures reste conservée. Dans le réseau final, nous pouvons donc retrouver les premières fractures, celles qui traversent toute la surface, et les dernières qui sont très courtes (Figure 5.1.13 d).

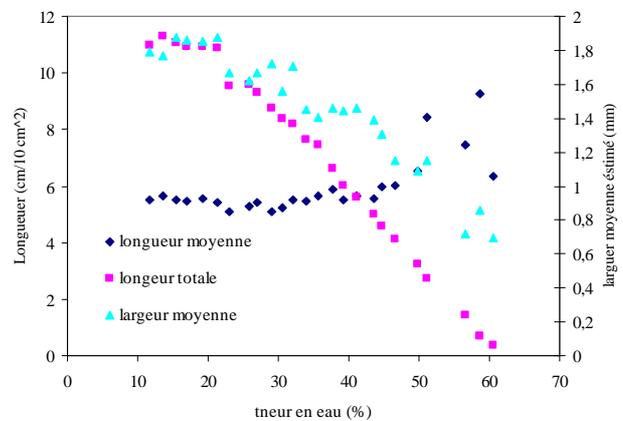
On peut donc déduire à partir de nos résultats (Tableau 5.1.2) que la géométrie des fissures dépend de la nature du support (surface de séchage).

Tableau 5.1.2 : Caractéristiques des fissures observées sur la surface des échantillons d'EMBA-1

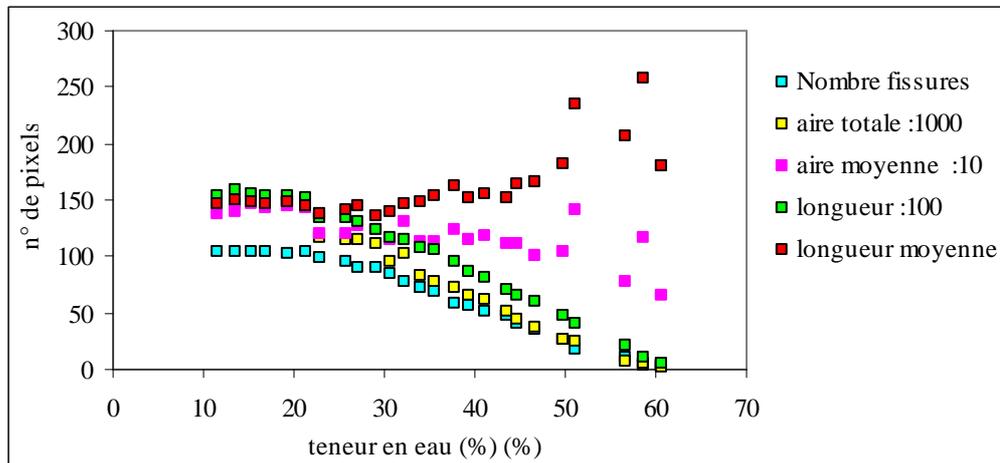
	Dessiccation libre (sur surface lisse)			Surface rugueuse
Dimensions	D = 88 mm, e = 5mm	D = 185 mm, e = 10 mm	114 x 84 mm, e = 5 mm	D = 185 mm, e = 10 mm
Nombre de fissures	9	10	9	> 104
Nombre de points d'interception	4	6	7	> 80
Ouverture moyenne estimée (mm)	3	6	5	< 1 (comprise entre < 1 mm et 5 mm)
Estimation des angles d'interception (°)	120	120	120	90 et 120



(a)



(b)



(c)

Figure 5.1.12 : Evolution du réseau de fissures à la surface d'un d'échantillon de Marne bleues d'Argenteuil remaniée : a) rapport surface de fissure / surface du sol, b) longueur et largeur moyenne des fissures c) paramètres identiques en n° de pixels (surface de l'échantillon d'origine 1050 x 1050 pixels)

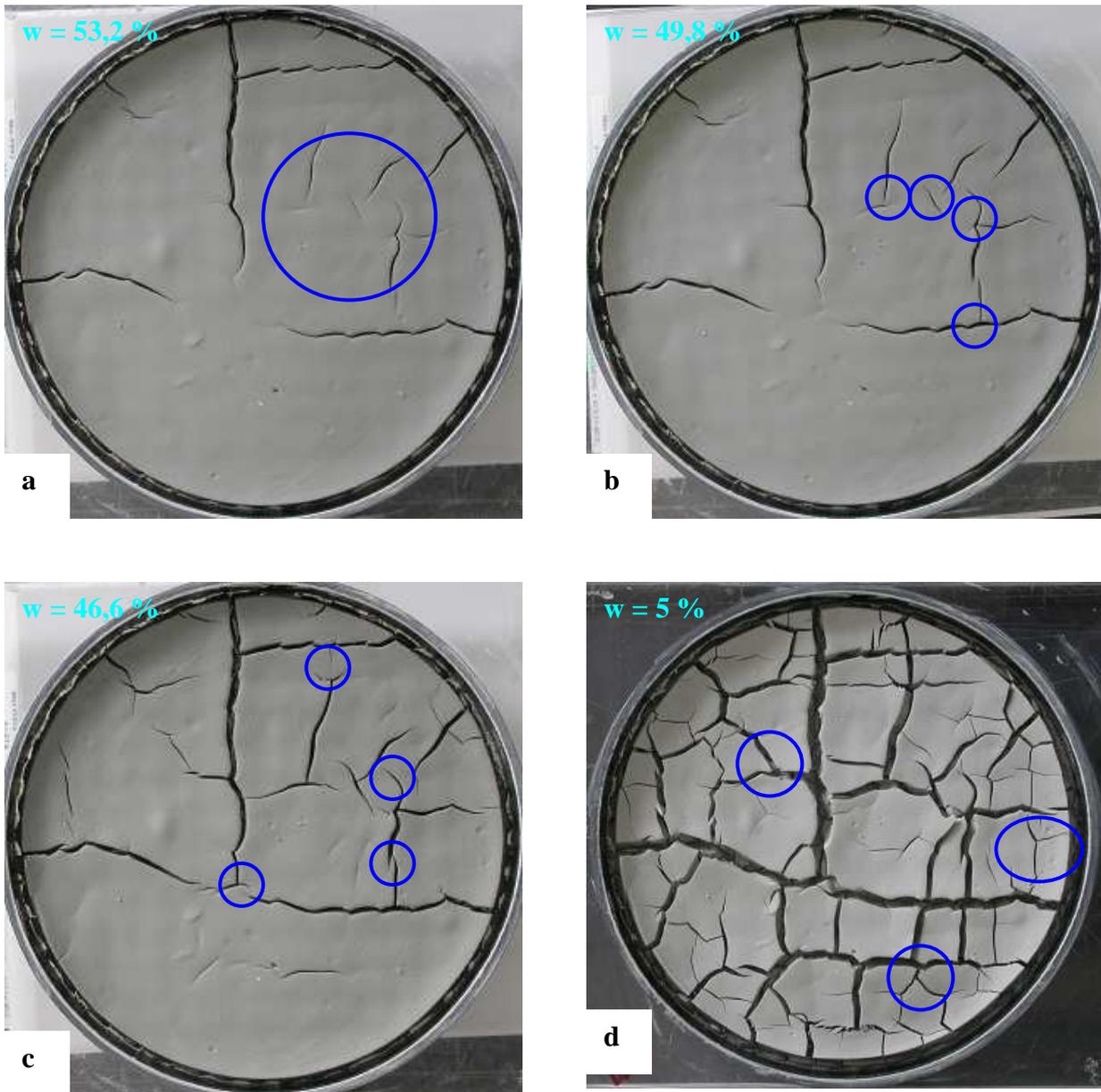


Figure 5.1.13 : Processus de fissuration des Marnes bleues d'Argenteuil remaniée : a) initiation des fissures, b) initiation de fissures s'interceptant à 90°, c) les nouvelles fissures rejoignent à angle droit les anciennes, sans les perturber, d) géométrie finale de la fissuration avec fissures s'interceptant à 120° (encerclé)

5.1.3 Evolution de la teneur en eau et de la succion à la fissuration

Sur la Figure 5.1.14 est représentée la courbe d'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour un échantillon de Marne bleue d'Argenteuil remaniée, séché sur une surface rugueuse. On note que la fissuration a augmenté la vitesse de séchage par rapport aux courbes données dans la Figure 5.1.1 c. Dès l'apparition de la première fissure, le taux de séchage augmente sensiblement et l'état sec final est atteint plus rapidement que dans les essais de dessiccation libre (2000 mn contre 5000 mn). La fissuration augmente considérablement le taux de séchage, puisqu'elle crée de nouvelles surfaces d'évaporation.

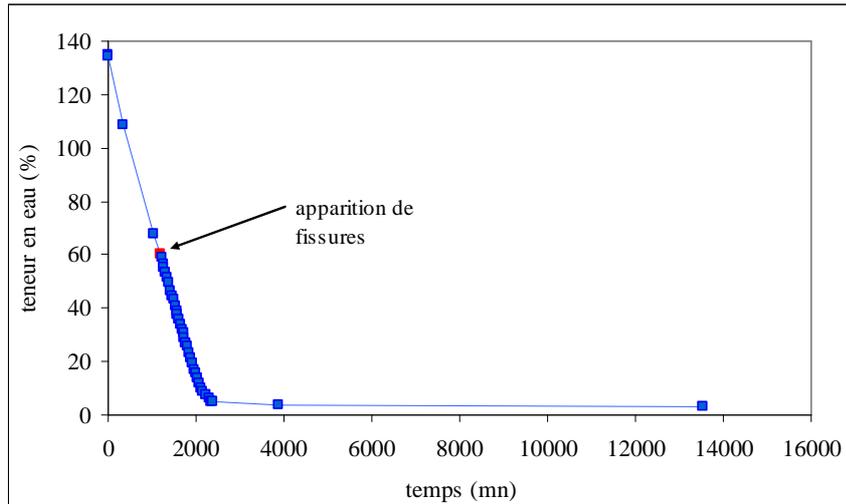


Figure 5.1.14 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps

Dans tous les cas où les échantillons d'EMBA-1 sont fissurés, la fissuration apparaît dans le domaine saturé à une teneur en eau largement supérieure à la limite de plasticité et très loin du point d'entrée d'air. La fissuration n'a pas ou très peu évolué en-dessous de la limite de retrait du sol. Avila (2004) a effectué des essais similaires de dessiccation dans différents moules et dans des conditions restreintes à partir d'un sol saturé. Travaillant sur l'argile de Bogota (une argile d'origine lacustre très plastique, de limite de liquide : 63 % et e limite de plasticité : 34 %), il a remarqué que plus le retrait est empêché plus la teneur en eau d'apparition des fissures est élevée. Il a remarqué que, pour un moule avec une faible rugosité, les valeurs de teneur en eau quand apparaît la fissuration correspondent à des degrés de saturation proches de 0,85 à 1 (très proche de la limite inférieure du domaine saturé). Dans un cas, il a même observé l'absence de fissuration. Dans les autres moules, présentant une plus grande rugosité, la fissuration apparaît pour des valeurs encore plus fortes. Dans le cas de la Marne bleue d'Argenteuil, celle-ci se fissure même dans des conditions de dessiccation libre à une teneur en eau très élevée (> 55 %). Ceci peut être lié à la présence de points durs (carbonates) qui s'opposent aux propriétés lubrifiantes des minéraux argileux et créent des discontinuités dans la matrice argileuse.

5.1.4 Conclusion

Les résultats exposés dans cette partie montrent que les deux formations étudiées ne présentent pas le même comportement vis à vis de la fissuration au cours des cycles drainage-imbibition.

Dans le cas de l'Argile verte intacte, ces cycles successifs révèlent d'anciennes surfaces de micro-cisaillement ou « slickensides » qui s'ouvrent à nouveau sous l'effet des sollicitations hydriques et conduisent à la destruction du matériau pour des teneurs en eau supérieures à la limite de retrait. Pour l'Argile verte de Romainville remaniée, la plupart des éprouvettes ne présentent pas de fissuration à l'exception d'une seule. Cette absence de fissuration peut-être attribuée au rôle lubrifiant exercé par les argiles. Au cours de l'imbibition, l'éprouvette est complètement détruite.

A l'opposé, la Marne bleue d'Argenteuil intacte ne présente aucune fissuration au cours des cycles successifs, même pour des teneurs en eau supérieures à la limite de retrait, quelle que soit la teneur en eau. Ce phénomène peut être attribué à la présence d'un squelette semi-rigide formé par les carbonates.

Lorsque la Marne bleue d'Argenteuil est remaniée, ce squelette est détruit, les grains de carbonates jouent alors un rôle de points durs, en créant des forces de frottement au contact du support qui s'opposent localement aux forces de rétraction et permettent ainsi la fissuration. Cette fissuration est observée sur les échantillons séchés sur une surface lisse et rugueuse, et la teneur en eau à la fissuration est toujours dans le domaine plastique, très supérieure à la limite de retrait du sol.

Cependant quelle que soit la formation géologique, le phénomène de fissuration observé sur les matériaux remaniés est fonction du volume (plus précisément de la hauteur des éprouvettes) et de la nature de l'interface matériau-support. Au dessus de 10 mm pour les surfaces lisses et de 20 mm pour les surfaces rugueuses, aucune fissuration n'a été observée. La nature de la surface de contact joue aussi un rôle primordial dans la fissuration des matériaux remaniés.

5.2 Aspects microstructuraux du retrait-gonflement des sols argileux

5.2.1 Introduction

Le but de ce sous-chapitre est de présenter le deuxième ensemble des résultats tirés de l'étude expérimentale. Il s'agit notamment d'essayer de préciser les relations entre la déformation macroscopique des sols étudiés et l'évolution de leur texture/microstructure.

L'analyse texturale/microstructurale a été réalisée suivant deux approches, l'une qualitative fondée sur l'observation microscopique et l'autre quantitative s'appuyant sur la porosimétrie au mercure.

Les observations effectuées sur des échantillons de quelques mm³ au microscope électronique à balayage (MEB) nous ont permis d'évaluer les différents paramètres de texture que sont l'arrangement des grains, le litage, la microfissuration ou la porosité à différentes échelles. Les courbes porosimétriques obtenues par porosimétrie au mercure nous ont permis de quantifier certains paramètres géométriques comme la taille des rayons d'accès de pores et le volume poreux accessible au mercure.

5.2.2 Préparation des échantillons

La microstructure des matériaux intacts à teneur en eau initiale ou après différents cycles de gonflement et retrait a été analysée à partir d'échantillons préalablement lyophilisés. La lyophilisation dont le principe et la méthode sont décrits dans les travaux de Delage (1979), Parcevaux (1980), Delage et Pellerin (1984), permet de conserver la microstructure initiale des échantillons lors de la déshydratation. Dans le cadre de notre étude, les échantillons parallélépipédiques de quelques millimètres de long (< 5 mm) sont congelés rapidement dans de l'azote liquide amené à son point de congélation (-196°C) par application du vide, suivi d'une phase de sublimation sous un vide inférieur à 0,05 mm Hg en plaçant les échantillons dans un lyophilisateur où la vapeur d'eau est condensée dans un piège à eau à -80 °C. La durée de la lyophilisation dépend de la taille de l'échantillon et de sa teneur en eau. Dans nos expériences, les échantillons ont été lyophilisés au moins 48h.

Nous ne discuterons pas ici de la qualité de cette technique du point de vue de la conservation de la texture de l'échantillon ni de son aptitude à extraire l'eau. Néanmoins, on remarque que Parceveaux (1980), Delage et Pellerin (1984) ont noté que dans les conditions de congélation les plus rapides, la perturbation structurale est minimale (avec des augmentations ou des diminutions de volume toujours inférieures à 2 % selon Parceveaux, 1980). Par contre, les résultats obtenus par Guillot et al. (2002) en chauffant des échantillons, préalablement lyophilisés, à 450°C, montrent qu'il reste effectivement de l'eau après lyophilisation correspondant à une porosité résiduelle de 5 à 10 % de la porosité totale de l'échantillon. Ils ont remarqué que quelque soit la technique de déshydratation utilisée (séchage à 105 °C ou lyophilisation) de l'eau subsiste dans les échantillons qui est vraisemblablement de l'eau interfoliaire.

5.2.3 Description sommaire des techniques opératoires

5.2.3.1 Microscopie électronique à balayage

L'observation au MEB a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage de type JEOL JSM-840A. Les surfaces observées ont été obtenues par cassure franche après congélation dans de l'azote de fragments d'échantillons de quelques mm² de section pris perpendiculairement ou parallèlement au litage. Delage et Pellerin (1984) ont noté que la glace maintient en place les particules au cours de la rupture, évitant ainsi les phénomènes d'arrachement et de déplacement et que le plan de fracture ne correspond pas à un plan de faiblesse de la structure déshydratée, mais traverse bien les différents niveaux d'organisation.

5.2.3.2 Porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure (Diamond, 1970; Pellerin, 1979 ; Delage et Pellerin 1984) repose sur le fait que le mercure est un liquide non-mouillant. Pour le faire pénétrer dans un milieu poreux, il est donc nécessaire de lui appliquer une pression d'autant plus forte que la dimension des pores est petite. Si on assimile ces pores à une succession d'étranglements et d'évasements de section circulaire, on peut relier par la loi de Washburn la pression d'entrée du mercure à un rayon d'accès du milieu poreux. Le rayon d'entrée des pores envahis par le mercure est ainsi calculé en utilisant la relation de Washburn :

$$P = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{r}$$

Avec P la pression d'intrusion de mercure

γ la tension de surface du mercure égale à 484 mN/m

θ l'angle de contact mercure/solide pris égal à 140 ° dans cette étude

r le rayon d'accès des pores

On obtient ainsi une courbe - volume poreux pénétré/rayon d'accès des pores -, qui est la courbe porosimétrique, donnant la distribution des rayons d'accès au milieu poreux.

Il faut remarquer que le porosimètre au mercure ne mesure pas la vraie dimension des pores, mais leurs rayons d'accès. L'accessibilité des pores n'est pas ordonnée des plus grands aux plus petits. Dans le cas des pores en « bouteille d'encre » ou présentant des étranglements

(Figure 5.2.1), par le jeu des connectivités, la partie évasée n'est remplie que lorsque le mercure est injecté à une pression relativement forte. Or dans les calculs, cette pression correspond à une taille de pores beaucoup plus petite. Ainsi tout le volume du pore sera comptabilisé sous la dimension de son rayon d'accès (ou constriction). Si globalement le volume de mercure injecté correspond effectivement à une certaine porosité, en revanche la distribution des pores peut être inexacte. En effet, le nombre de pores de petite taille est surévalué par rapport au nombre de gros pores qui lui est sous-évalué. Il serait nécessaire de réaliser des cycles d'injection-extraction-réinjection du mercure pour avoir un meilleur aperçu de la réalité des phénomènes. Delage et Pellerin (1984) ont noté que les pores de type « bouteille d'encre » piègent le mercure à la décompression, du fait des tensions capillaires agissant sur la constriction. Pellerin (1979) a proposé de pratiquer une double injection afin de distinguer une porosité piégée d'une porosité libre correspondant au mercure qui ressort de l'échantillon à la décompression. La première injection (Figure 5.2.1, courbe 1) mesure la porosité totale; la deuxième injection (Figure 5.2.1, courbe 2) mesure la porosité non-piégée, ou libre, dont les rayons d'accès correspondent à la dimension des pores; la différence des deux courbes d'injection (Figure 5.2.1, courbe 3) donne la distribution des seuils d'accès à la porosité piégée.

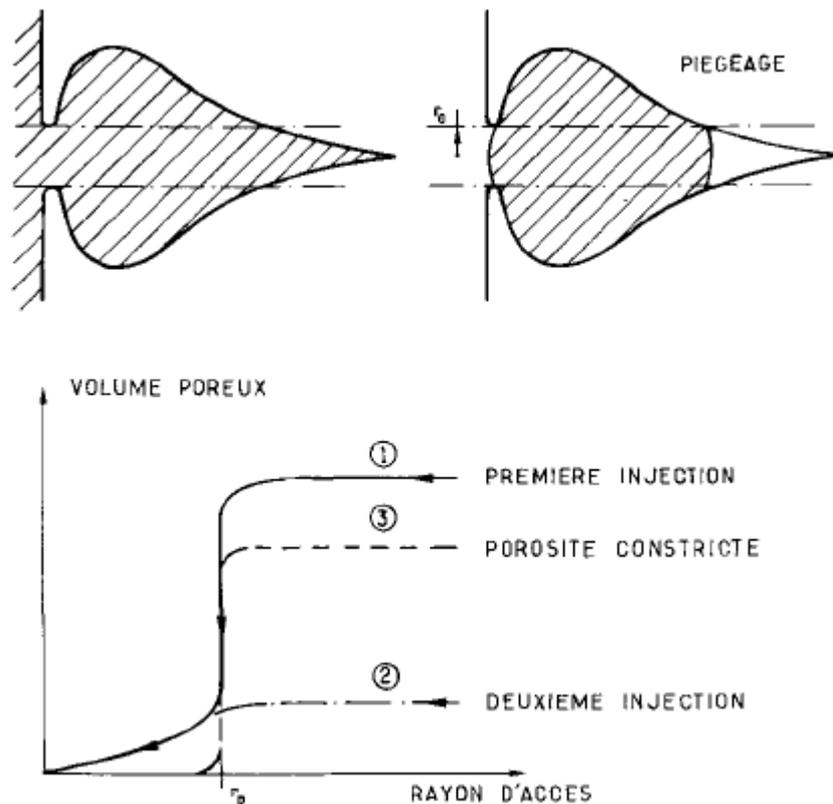


Figure 5.2.1 : Pore en encrier. (1) Première injection; (2) deuxième injection; (3) porosité piégée : soustraction (1) - (2), (d'après Delage Pellerin, 1984)

Dans le cadre de cette étude, un appareil Micromeritics AutoPore IV 9500 est utilisé. Il permet d'appliquer des pressions jusqu'à 228 MPa et d'analyser ainsi des tailles d'accès de pores de 360 μm à 6 nm de diamètre.

Afin d'évaluer la reproductibilité des résultats obtenu par l'appareil, des essais ont été effectués sur le même échantillon avec des poids secs similaires ou différents (Figure 5.2.2,

Figure 5.2.3). Il apparaît au vu de ces résultats que les essais qui sont répétés donnent des résultats assez similaires. Ceci indique que la reproductibilité est bonne et que l'effet d'échelle est minime.

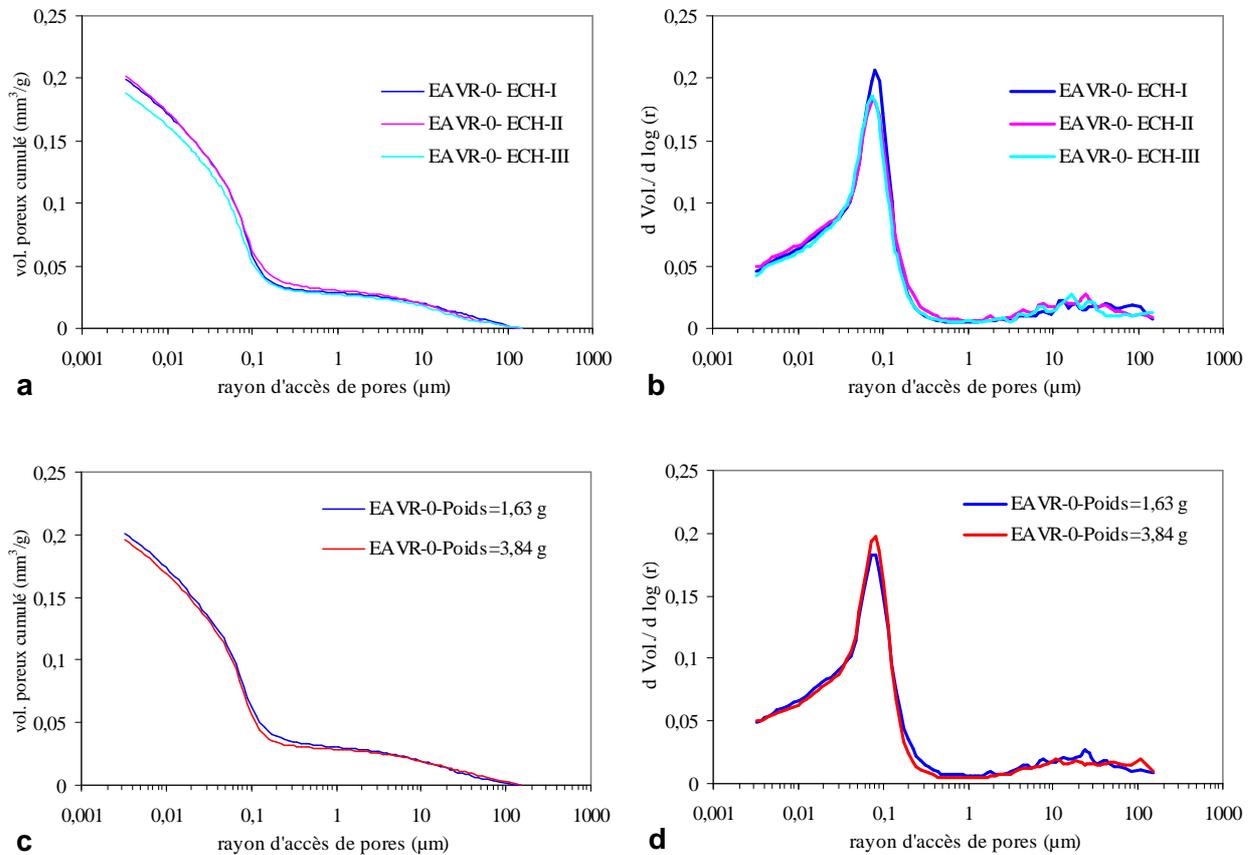


Figure 5.2.2 : Comparaison des courbes de porosimétrie au mercure cumulées et dérivées obtenues sur des échantillons naturels d'Argiles vertes de Romainville: a) volumes cumulés, b) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec similaire ; c) volumes cumulés, d) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec différents

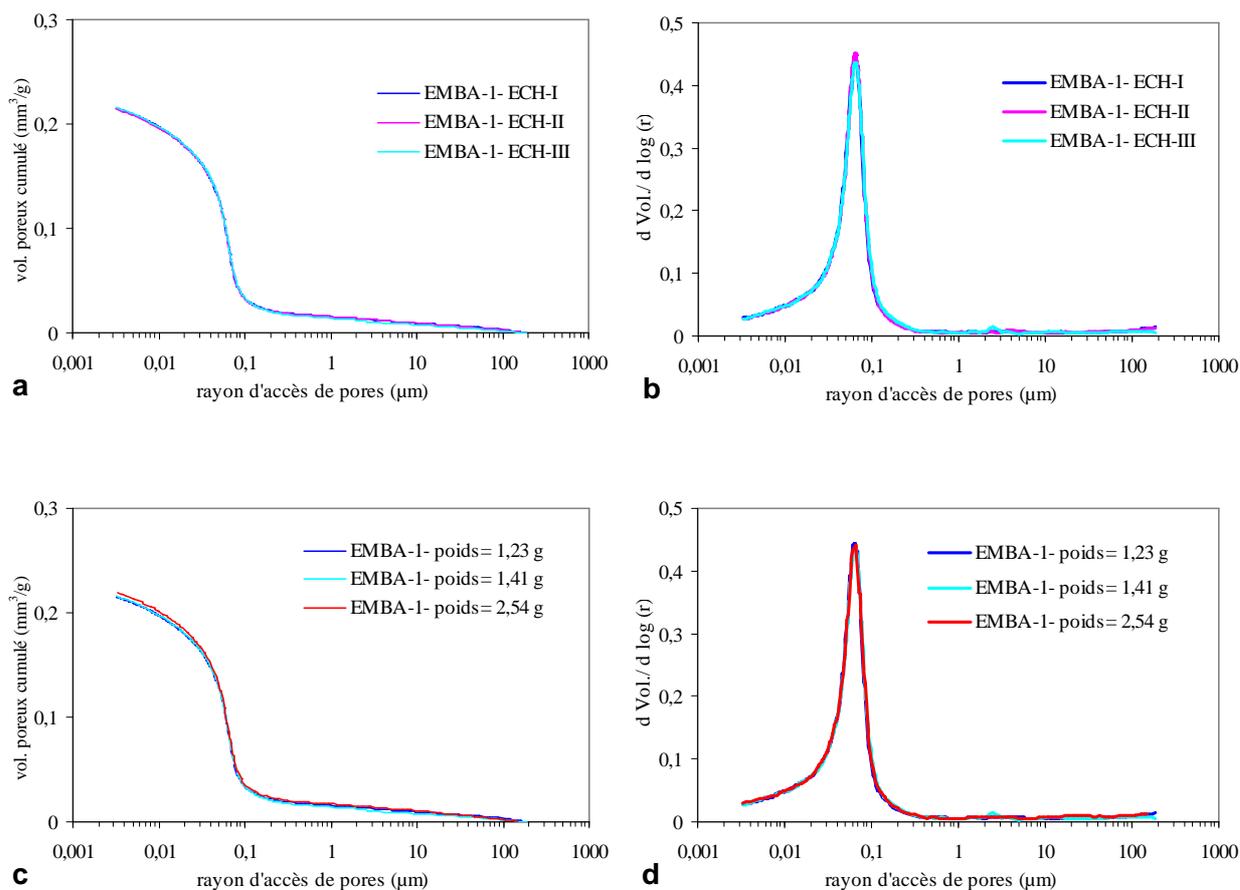


Figure 5.2.3 : Comparaison des courbes de porosimétrie au mercure cumulées et dérivées obtenues sur des échantillons naturels de Marnes bleues d'Argenteuil : a) volumes cumulés, b) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec similaire ; c) volumes cumulés, d) courbes dérivées pour des échantillons de poids sec différents

5.2.4 Caractéristiques microstructurales

Les sols fins sont organisés à des échelles différentes. Un état d'organisation spécifique correspond à chaque échelle d'observation ou d'étude. A l'échelle de l'échantillon à l'œil nu ou au microscope cette organisation est la texture, terme le plus souvent employé en géologie (Le Roux, 1972). Mais le terme « structure ou microstructure » est communément admis en science du sol et en géotechnique. Dans cette étude, nous utilisons les deux terminologies indifféremment. Comme le but de cette étude est d'étudier l'influence du gonflement sur la texture/microstructure du sol, nous n'avons pas cherché à entrer systématiquement dans une des classifications décrites dans le paragraphe 2 de la bibliographie placée en annexe. Néanmoins si nous avons à caractériser un type de texture, nous utiliserons la terminologie de Sergeyev et al. (1978).

Les termes utilisés pour décrire la texture ou microstructure sont les mêmes que ceux utilisés par Parcevaux (1980) et Touret (1990), (voir annexe). Les différents niveaux de constitution de la phase solide sont les suivants :

- particule ou cristallite élémentaire : empilement d'un certain nombre de feuillets, constituant la plus petite unité visible au MEB ;
- agrégat primaire : assemblage de particules constituant l'unité morphologique homogène à l'échelle de l'observation d'un état de référence : l'état naturel ;
- agrégat secondaire : unité morphologique provenant de l'évolution d'un agrégat primaire soit par division (ainsi l'agrégat secondaire est plus petit que l'agrégat primaire) soit par agglomération (ainsi l'agrégat secondaire est plus gros que l'agrégat primaire).

Les différents types de pores observés sont classés en fonction de leur géométrie et de leur taille :

- les pores sub-sphériques : si les 3 dimensions sont du même ordre de grandeur ;
- les canaux : si une dimension est grande par rapport aux deux autres ;
- les fissures ou microfissures ou pores bidimensionnels : si deux dimensions sont grandes par rapport à la troisième.

Pour notre étude les terminologies suivantes sont ajoutées :

- porosité matrice-grains (P_1) : porosité correspondant au contact de la matrice et des grains ;
- porosité de matrice (P_2) : porosité qui comprend la porosité exprimée entre les particules argileuses ou les amas argileux (P_3) et la porosité à l'intérieur des amas argileux (P_4) ;
- fissures (F) : porosité due aux fissures ou microfissures ouvertes.

5.2.4.1 Observation au MEB

Chaque formation étudiée (les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil) est décrite séparément, en insistant plus particulièrement sur l'évolution éventuelle de la texture au cours du gonflement ou du retrait, et une conclusion fait la synthèse de toutes nos observations.

Il faut noter que les images au MEB que nous présentons pour chaque état (naturel, remanié, gonflé,...) ne sont qu'une illustration représentative des nombreuses observations effectuées sur plusieurs échantillons.

5.2.4.1.a *Les Argiles vertes de Romainville*

Rappelons brièvement que les Argiles vertes de Romainville sont essentiellement composées de quartz, de carbonates (dolomite et/ou calcite), de traces de feldspaths et de micas et de minéraux argileux (de l'illite principalement, des interstratifiés illite-smectite et de la kaolinite). Elles présentent une granulométrie très fine (78 à 90 % < 2 μ m).

Sur la Figure 5.2.4 à Figure 5.2.15 sont représentées les images prises au MEB, suivant le plan du litage et/ou perpendiculairement au litage, des échantillons d'Argiles vertes de Romainville à l'état naturel ou dans les mêmes conditions que l'état naturel (teneur en eau, densité) (EAVR-0, EAVR-1, EAVR-C, WAVR-0, EAVR-0 et WAVR-0 remaniés) et après gonflement.

- **Caractérisation préalable des microstructures des matériaux à l'état naturel ou remanié**

Sur la Figure 5.2.4 sont représentées les images prises au MEB, suivant le plan du litage et perpendiculairement au litage, d'un échantillon d'EAVR-0 naturel dont la teneur en eau naturelle est de 25 %. Elles montrent un aspect laminaire-turbulent caractérisé par l'assemblage compact de particules argileuses formées d'illite, de kaolinite et d'interstratifiés illite-smectite. L'observation au MEB et l'analyse par sonde EDS montre que la microstructure est formée par une matrice argileuse relativement homogène dans laquelle les grains de quartz et de dolomite sont dispersés de façon aléatoire (Figure 5.2.4 a, b et e). Les agrégats ne sont pas individualisés. La comparaison entre les deux orientations - plan du litage (Figure 5.2.4 a et b) et perpendiculaire au plan du litage (Figure 5.2.4 c et d) - montre un arrangement préférentiel des particules argileuses parallèlement au litage. Dans le plan du litage, il est difficile d'apprécier clairement la porosité, l'arrangement des particules suivant leur face masquant les pores. Quelques pores au contact grains-argiles de taille inférieure à 0,2 micron sont observés. Sur le plan perpendiculaire au litage (Figure 5.2.4 d), les pores observés dans la matrice argileuse sont de forme allongée ; leur diamètre semble généralement inférieur à 0,3 μm (Figure 5.2.4 c). Sur l'image d, la présence d'une microfissure est observée.

Sur la Figure 5.2.5 et la Figure 5.2.6 sont représentées respectivement, les images prises au MEB suivant le plan du litage des échantillons naturels : EAVR-1 ($w=25,3\%$) et EAVR-C ($w=24,9\%$). La texture de l'échantillon EAVR-1 ne présente pas d'orientation privilégiée, mais est relativement compacte. Elle s'apparente au type matriciel. On ne note pas d'agrégats nettement formés séparés par des pores, mais plutôt un réseau de pores bidimensionnels (d'épaisseur 0,5 à 1 μm) discontinus (Figure 5.2.5 d). La présence de grains non argileux (quartz, dolomite et mica) entourés d'argiles est observée (Figure 5.2.5 b et c). La Figure 5.2.5 (c et d) montre qu'en plus de la porosité due aux espaces entre les amas argileux (P_3), et due à la microfissuration (F), il existe une porosité au contact entre les particules argileuses et les grains non argileux (P_1). Ces vides sont de l'ordre de quelques dixièmes de micromètre ($< 0,5\ \mu\text{m}$ de diamètre).

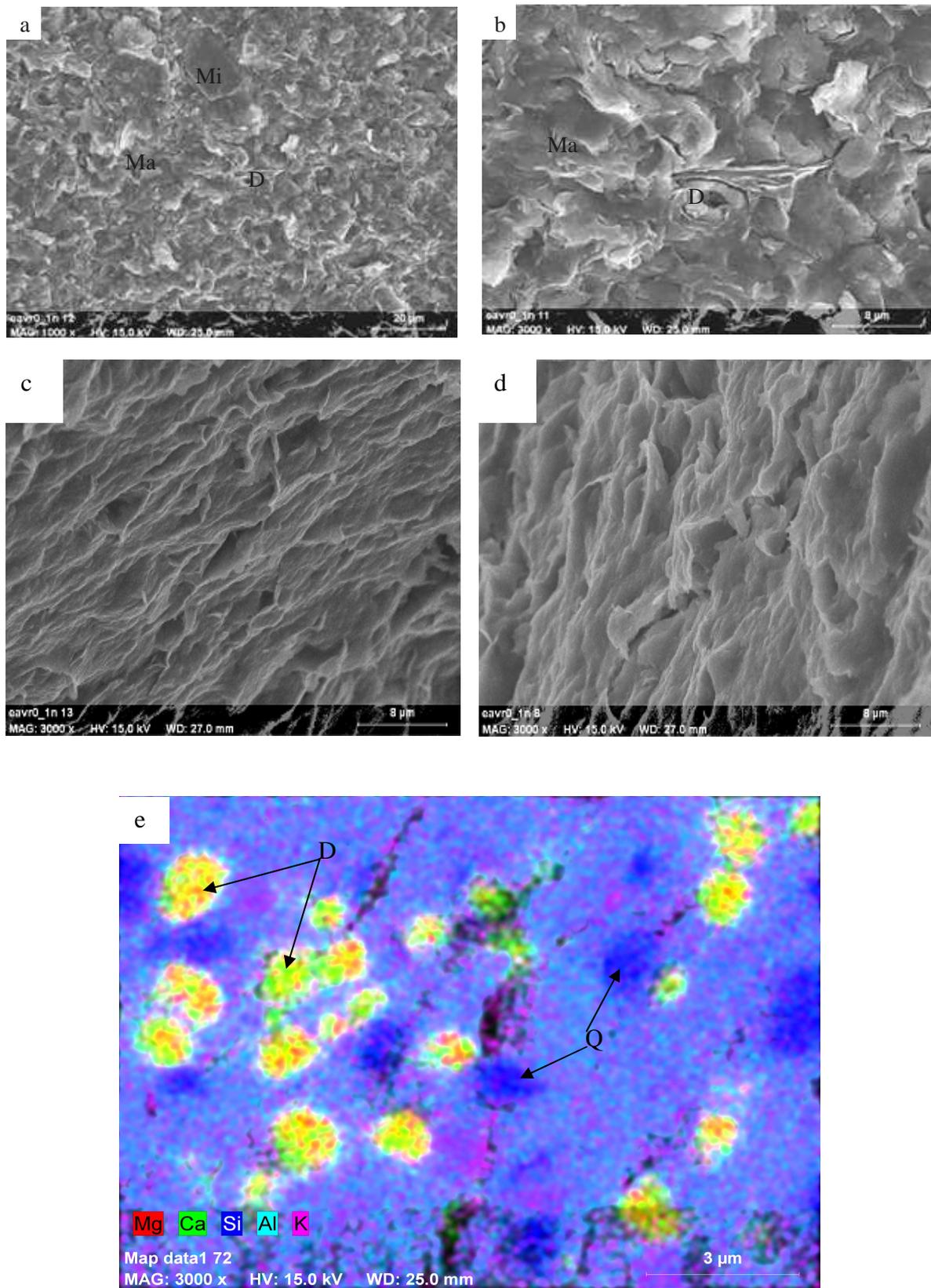
Pour l'échantillon EAVR-C (Figure 5.2.6), les particules ne présentent pas d'orientation préférentielle. La texture s'apparente globalement au type matriciel, mais avec des portions dispersées, à dominante argileuse (Figure 5.2.6 b). La microstructure est formée par une matrice argileuse peu homogène dans laquelle des grains de quartz de taille variable et de dolomite sont dispersés de façon aléatoire (Figure 5.2.6 c et d) ; par endroit on observe des smectites isolées (Figure 5.2.6 d). Quelques pores bidimensionnels, peu nombreux (dont l'épaisseur est inférieure à 1 μm) esquissent les bords d'amas argileux dont la taille est de l'ordre de la dizaine de microns (Figure 5.2.6 a et c), ils confèrent à la matrice un aspect compact.

Les observations au MEB d'un échantillon de WAVR-0 intact dont la teneur en eau naturelle est de 29,8 %, montrent une texture compacte avec une orientation préférentielle (Figure 5.2.7), qui n'est pas toujours très nette. On dénote donc une tendance à l'anisotropie. Elle s'apparente globalement au type matriciel-fluidal. On note la présence de grains de quartz et de calcite dispersés de façon aléatoire. Les agrégats ne sont pas bien individualisés. Dans le plan du litage (Figure 5.2.7 a et b), il est difficile d'apprécier clairement la porosité. Néanmoins, quelques fissures ouvertes ($< 0,5\ \mu\text{m}$ d'épaisseur) ont pu être observées. Sur le plan perpendiculaire au litage (Figure 5.2.7 c et d), des amas de particules argileuses de

quelques microns sont visibles. Les pores observés (espaces entre les amas argileux et au contact grains-argiles) sont de forme allongée, leur largeur est généralement inférieure à $0,5 \mu\text{m}$.

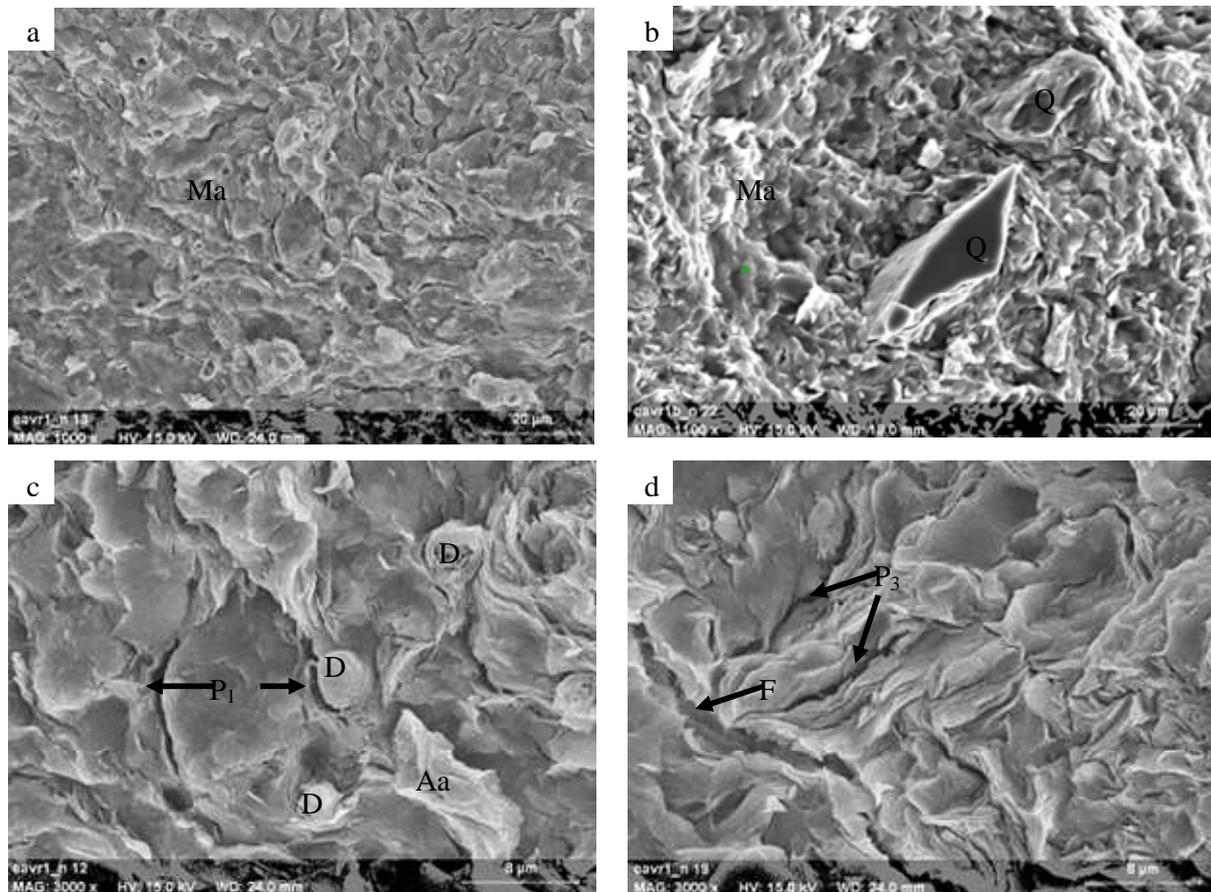
Les images présentées sur la Figure 5.2.8 montrent une vue parallèle au plan de dépôt des échantillons EAVR-0 remaniés ($w= 27,3 \%$) (a et b), et des échantillons de WAVR-0 remanié ($w=28 \%$) (e et f).

EAVR-0 remanié montre une texture compacte, les particules argileuses n'ont pas de disposition préférentielle, certaines se présentant suivant les faces, d'autres suivant les bords. Par endroit, on observe un aspect turbulent dû à l'arrangement des particules d'illite, de kaolinite et d'interstratifiés illite-smectite enrobant quelques grains de quartz et de carbonates (Figure 5.2.8 b, c et d). Le remaniement n'a pas totalement détruit les liaisons d'origine ; on observe des agrégats de quelques micromètres (Figure 5.2.8 a). L'orientation chaotique des particules argileuses laisse apparaître des vides entre elles ($< 0,5 \mu\text{m}$ de diamètre).



D-dolomite, Q-quartz, Ma-matrice argileuse, Mi-mica

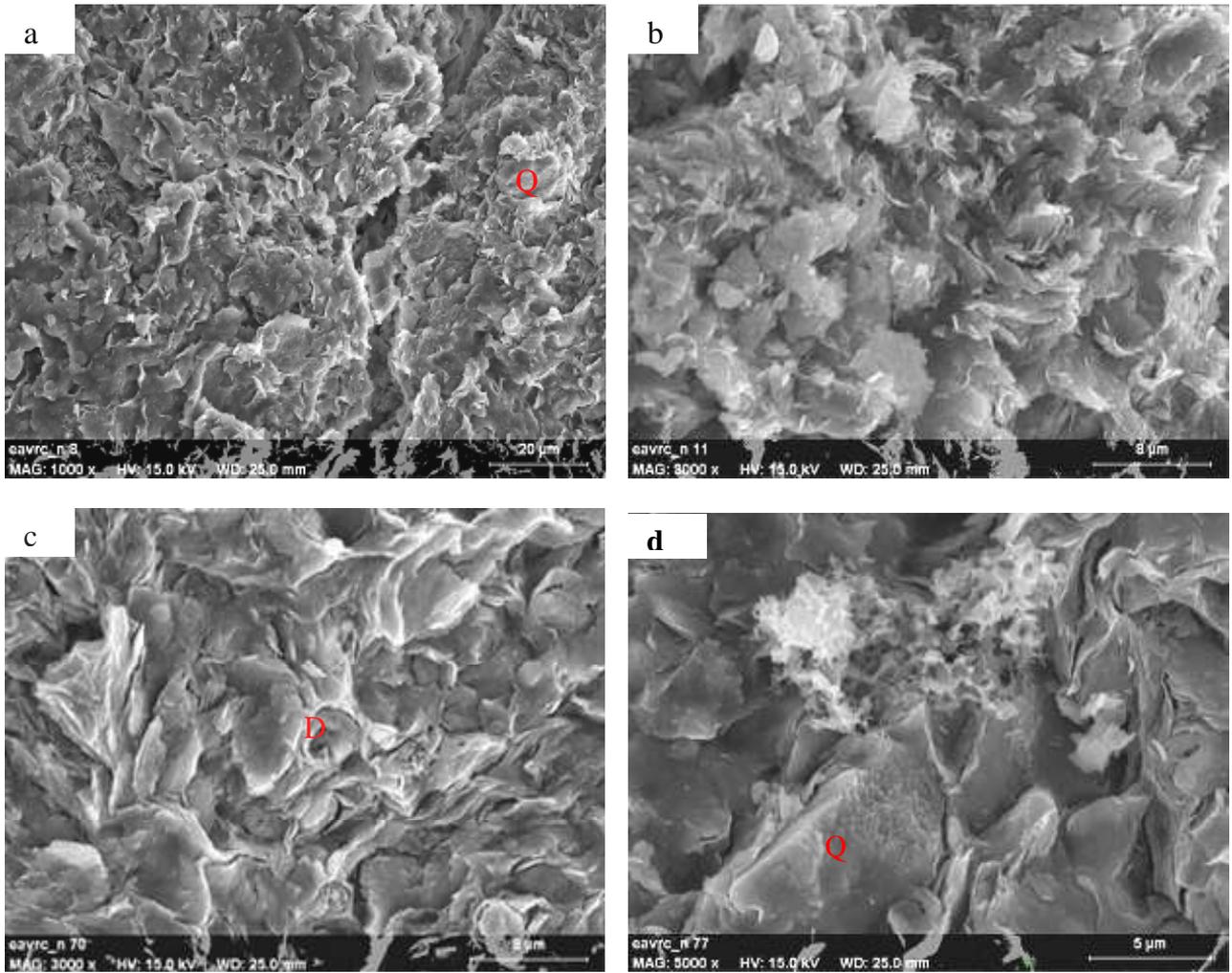
Figure 5.2.4 : Texture d'EAVR-0 naturel (w= 24,9 %) : dans le plan de litage (a et b), perpendiculaire au plan du litage (c et d), et e) cartographie EDS, présence de nombreux grains de carbonate et de quartz



D-dolomite, Q-quartz, Ma-matrice argileuse, Mi-mica, F-fissure, P₁-pore grains-argiles, P₃-pore entre amas argileux

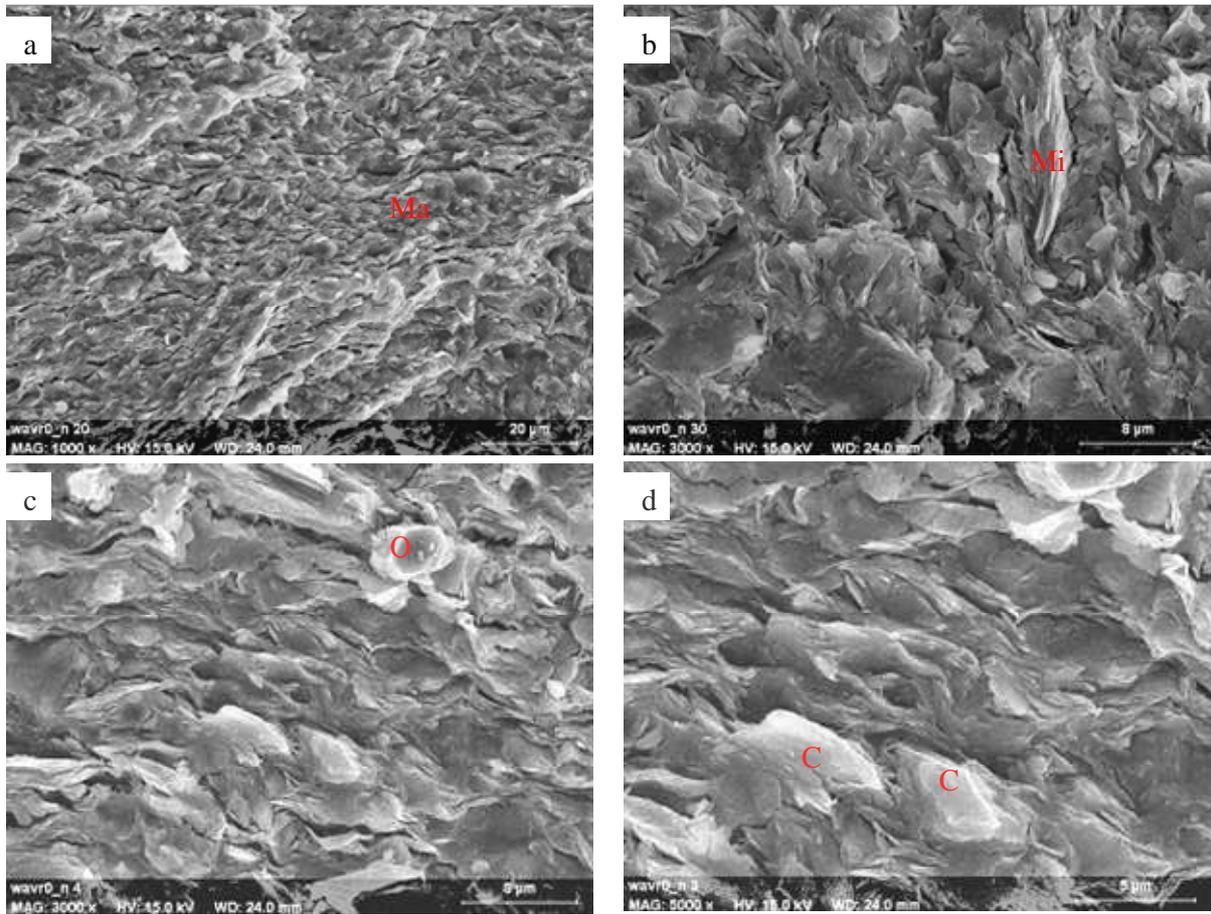
Figure 5.2.5 : Texture d'EAVR-1 naturel (w= 25,3 %) dans le plan du litage : (a) vue globale (b) présence de quartz (c) détail des contacts entre des grains non-argileux et les argiles et (d) détail de contacts entre les amas argileux et présence de microfissure

WAVR-0 remanié montre une texture hétérogène à tendance matricielle majoritairement et parfois en squelette, hétérogène (présence de grains non argileux) et compacte. Les particules argileuses ne présentent pas d'orientation préférentielle. Les grains de carbonate ou de quartz enrobés et disséminés dans la matrice argileuse sont mis à nus. Il apparaît que sur le plan de fracture observé, il y a une concentration de carbonates. Les pores observés au contact grain-matrice et entre les amas argileux ont une épaisseur inférieure à 0,5 μm .



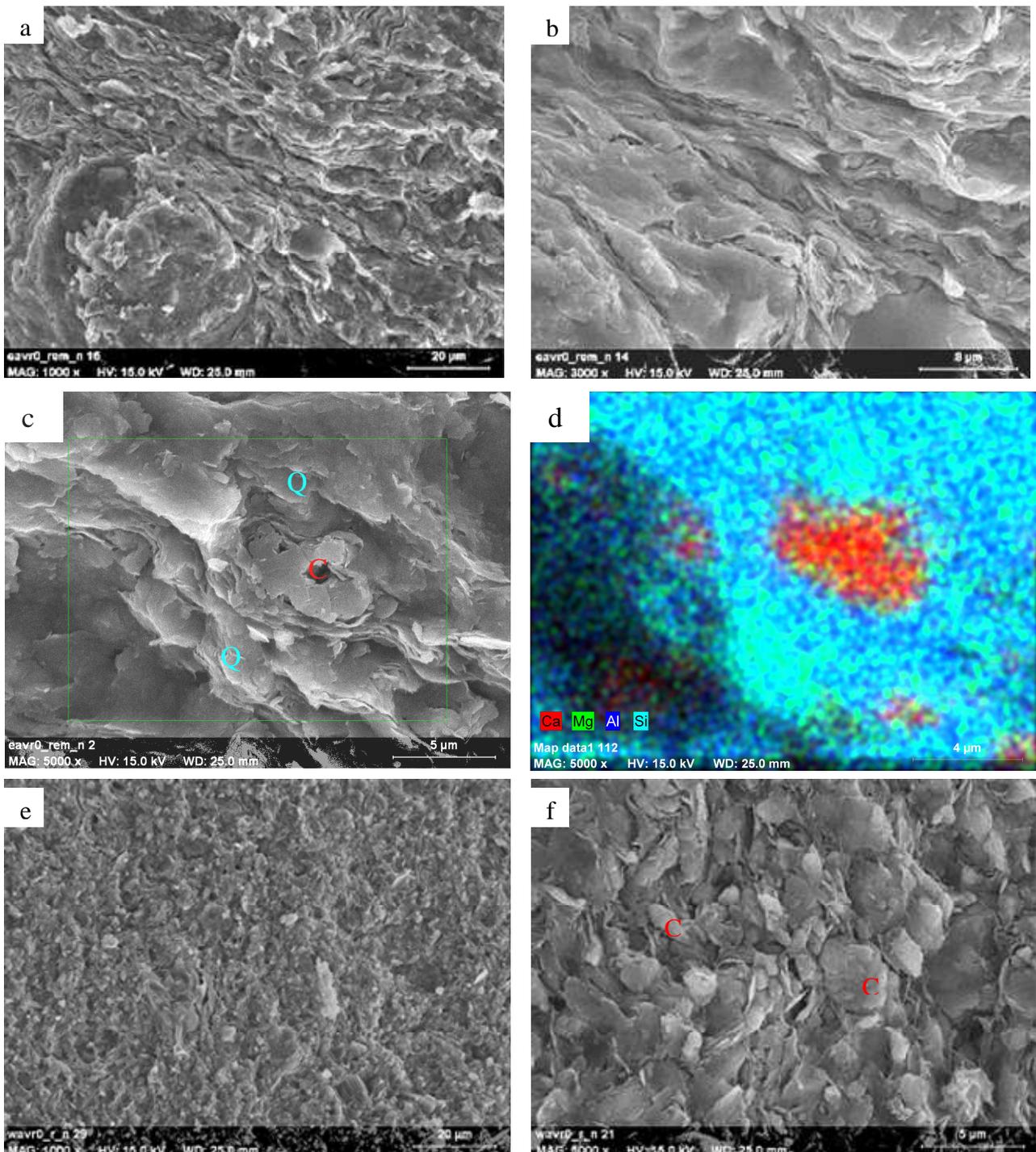
D-dolomite, Q-quartz

Figure 5.2.6 : Texture d'EAVR-C naturel (w= 24,9 %) dans le plan du litage : (a) vue globale, (b) texture à dominante argileuse, (c) présence des grains de dolomite, (d) présence de smectites et de grains de quartz



D-dolomite, Q-quartz, Ma-matrice argileuse, Mi-mica, c-calcite

Figure 5.2.7 : Texture de WAVR-0 naturel (w= 29,8 %) : dans le plan du litage (a et b) et perpendiculaire au plan du litage (c et d)



D-dolomite, Q-quartz, C-calcite

Figure 5.2.8 : Texture d'un échantillon d'EAVR-0 remanié dans le plan du dépôt (a, b et c), (d) cartographie EDS, présence de carbonate (calcite, C) et de quartz (Q) ; (e et f) : texture d'un échantillon de WAVR-0 remanié perpendiculaire au plan du dépôt

○ **Observations au MEB de l'évolution de la microstructure après un cycle de gonflement**

Les images présentées sur la Figure 5.2.9 montrent la microstructure de l'échantillon EAVR-0 après un essai de gonflement libre (taux de gonflement de 18,8 %, teneur en eau finale de 39,3 %) dans le plan du litage (a et b) et perpendiculaire au plan du litage (c et d). Les observations réalisées sur le plan de litage, montrent une conservation de la texture orientée d'origine, à l'exception toutefois de l'apparition des microfissures de grande extension, d'épaisseur micrométrique, recoupées par de nombreuses petites fissures ayant une épaisseur inférieur à 1 μm (Figure 5.2.9 a, et b). Dans le plan perpendiculaire au litage, on observe une texture plus aérée et une légère orientation (Figure 5.2.9 c). Un réseau de pores bidimensionnels d'épaisseur 0,5 à 1 μm amorçant des délimitations d'agrégats primaires de taille de quelques microns à plusieurs dizaines de microns est observé. Ces agrégats sont constitués d'agrégats secondaires de tailles très diverses formés de cristallites argileux assemblés face contre face (Figure 5.2.9 d).

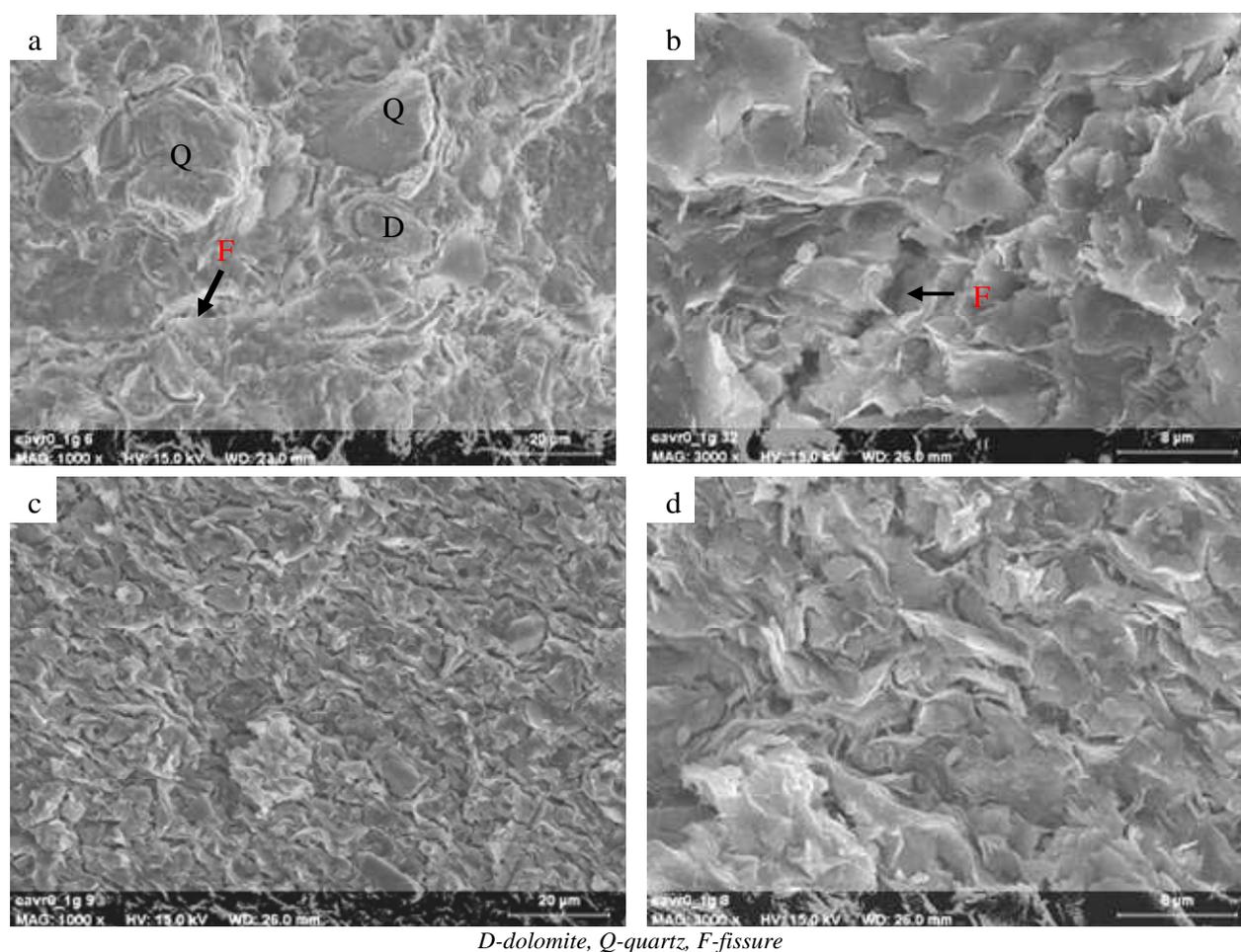


Figure 5.2.9 : Texture d'un Echantillon d'EAVR-0 après un cycle de gonflement libre ($w= 39,3 \%$) dans le plan du litage (a et b), et perpendiculaire au plan du litage (c et d)

La comparaison avec la texture du sol naturel montre une très nette évolution au cours du gonflement. Le sol possède, en son état naturel, une texture compacte aux pores fins et allongés. C'est dans ces zones privilégiées que l'eau est attirée pendant le processus de

gonflement. Ces pores s'agrandissent au cours du gonflement, et délimitent des agrégats primaires de quelques dizaines de microns, qui se subdivisent ensuite en agrégats secondaires plus petits, faisant apparaître ainsi plusieurs familles de tailles de pores.

Les images présentées sur la Figure 5.2.10 montrent la texture de l'échantillon EAVR-1 après un essai de gonflement libre (taux de gonflement de 27,8 %, teneur en eau finale de 43,6 %) dans le plan du litage (a et b) et perpendiculaire au plan du litage (c, d et e). Les observations réalisées sur le plan du litage et perpendiculaire au plan du litage, montrent la destruction de la texture originale, qui est la conséquence directe du gonflement des argiles. La microstructure apparaît comme une matrice argileuse relativement homogène, mais lâche. Dans le plan du litage, on observe l'apparition de nombreuses microfissures plus larges, ayant une épaisseur de 0,5 à 1 μm (Figure 5.2.10 a), délimitant des agrégats en moyenne assez gros (de 10 à 30 μm). Dans le plan perpendiculaire au litage, on observe une texture plus aérée sans orientation préférentielle, constituée d'agrégats de tailles variables (de 10 à 20 μm de dimension moyenne) séparés par des pores allongés d'épaisseur 1 à 1,5 μm (Figure 5.2.10 c et d). Les agrégats sont reliés entre eux par des ponts argileux (Figure 5.2.10 e). Ceux-ci sont souvent redivisés en agrégats secondaires plus petits ou en voie de redivision.

L'évolution de la texture au cours de gonflement est beaucoup plus nette pour EAVR-1 que pour EAVR-0. En effet, l'échantillon EAVR-1 présente le gonflement le plus fort parmi les échantillons observés au MEB (~ 28 %), entraînant ainsi une déstructuration forte de la texture initiale. La texture matricielle est conservée tout au long du processus, mais le gonflement de la matrice argileuse résulte de l'ouverture de microfissures et de pores bidimensionnels dont la conséquence est la création d'agrégats plus petits. Les pores sont de nature plutôt bidimensionnelle et leur épaisseur s'accroît au cours du gonflement.

Les observations réalisées au MEB, après que l'échantillon EAVR-C ait subi un cycle de gonflement (taux de gonflement de 18,5 %, teneur en eau finale $w=41,4$ %) montrent une texture beaucoup plus aérée, sans orientation préférentielle (Figure 5.2.11). Des pores bidimensionnels d'environ 1,5 à 2 microns d'épaisseur délimitent des agrégats primaires de dimension de plusieurs dizaines de microns, redivisés eux-mêmes en agrégats secondaires, plus petits, séparés par des pores d'épaisseur inférieure à 1,5 micron (Figure 5.2.11 a). Les zones dominées par les smectites gonflent et provoquent la fracturation de la partie relativement plus rigide de la matrice que sont les amas argileux formés par de l'illite et de la kaolinite (Figure 5.2.11 b). De manière très localisée on observe le gonflement d'amas de smectites, formés par un assemblage de feuillets de montmorillonite dont les empilements s'organisent en « nids d'abeille » avec une ouverture de pores (sub-sphériques) comprise entre 2 et 4 μm de diamètre (Figure 5.2.11 c et d).

Les images présentées sur la Figure 5.2.12 montrent une vue perpendiculaire au plan de stratification d'un échantillon de WAVR-0 après gonflement libre (taux de gonflement de 10,4 %, teneur en eau finale $w=37,5$ %). La texture est beaucoup plus aérée, sans orientation préférentielle. La texture fluidale originale est peu conservée. Des pores bidimensionnels d'environ 1 micron d'épaisseur délimitent des agrégats primaires de dimension de plusieurs dizaines de microns (Figure 5.2.12 a), redivisés eux-mêmes en agrégats secondaires plus petits séparés par des pores d'épaisseur inférieure à 1 micron (Figure 5.2.12 b, c et d). Certains de ces agrégats primaires sont en cours de division, phénomène visualisé par des amorces de pores. Les agrégats sont constitués essentiellement de particules d'illite (Figure 5.2.12 d).

De même que pour les sols précédemment décrits, l'évolution de la texture des échantillons de EAVR-C et de WAVR-0 au cours du gonflement est très nette. On passe d'une texture d'origine compacte vers une texture plus aérée, où la matrice est découpée par un réseau de microfissures évolutives qui créent des agrégats de taille décroissante au fur et à mesure que le processus de gonflement se propage.

Les observations au MEB des échantillons EAVR-0 remaniés après un cycle de gonflement (taux de gonflement de 32 %, teneur en eau finale 51,3 %) montrent une texture originale conservée mais très aérée. Les images (Figure 5.2.13 a et c) prises à faible grandissement suivant le plan de dépôt et perpendiculaire à ce plan montrent une texture turbulente où le gonflement des argiles provoque l'ouverture des pores bidimensionnels (de 1 à 2 microns) qui délimitent des agrégats des tailles diverses (de quelques microns à 20 microns) formés de cristallites argileux assemblés face contre face (Figure 5.2.13 a, b). L'image présentée sur la Figure 5.2.13 d montre la porosité exprimée au cours du gonflement à l'intérieur des amas de particules argileuses. La taille des pores de cet espace poreux est inférieure à 1 micron.

Les observations au MEB des échantillons WAVR-0 remanié après un cycle de gonflement (taux de gonflement de 24 %, teneur en eau finale 41,2 %) montrent une texture d'origine conservée, mais plus aérée (Figure 5.2.13 e). On note la présence d'agrégats de dimension moyenne 5 à 10 microns, séparés par des pores dont l'épaisseur peut atteindre 1 micron par endroit (Figure 5.2.13 f).

Bien que les observations soient moins nettes pour WAVR-0 remanié, en raison de la présence élevée de grains de calcite sur le plan observé, la microstructure évolue au cours du gonflement suivant le même chemin que celui des matériaux précédemment décrits.

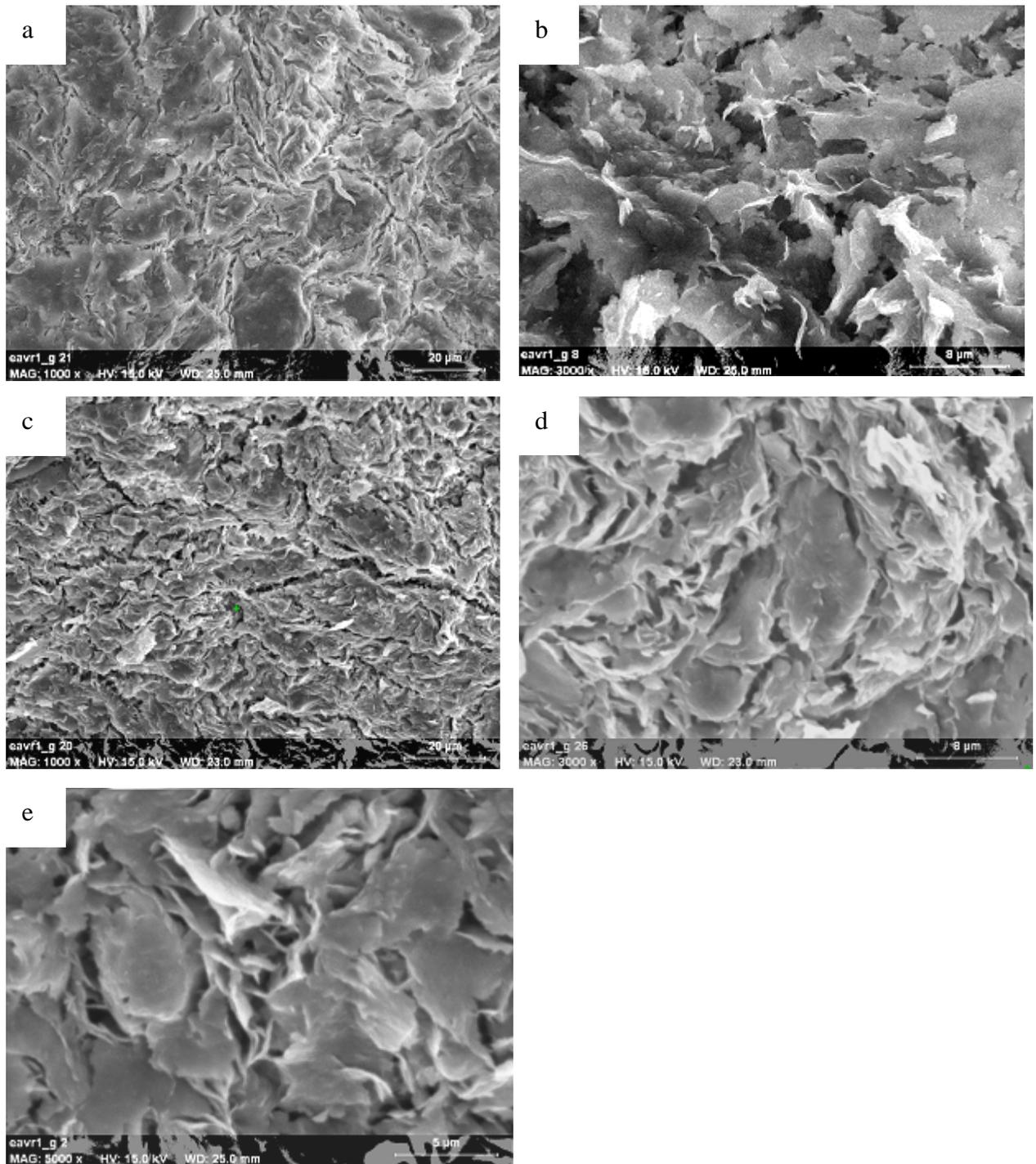


Figure 5.2.10 : Texture d'un Echantillon d'EAVR-1 après un cycle de gonflement libre : a) et b) dans le plan du litage ; c) d) et e) perpendiculaire au plan du litage

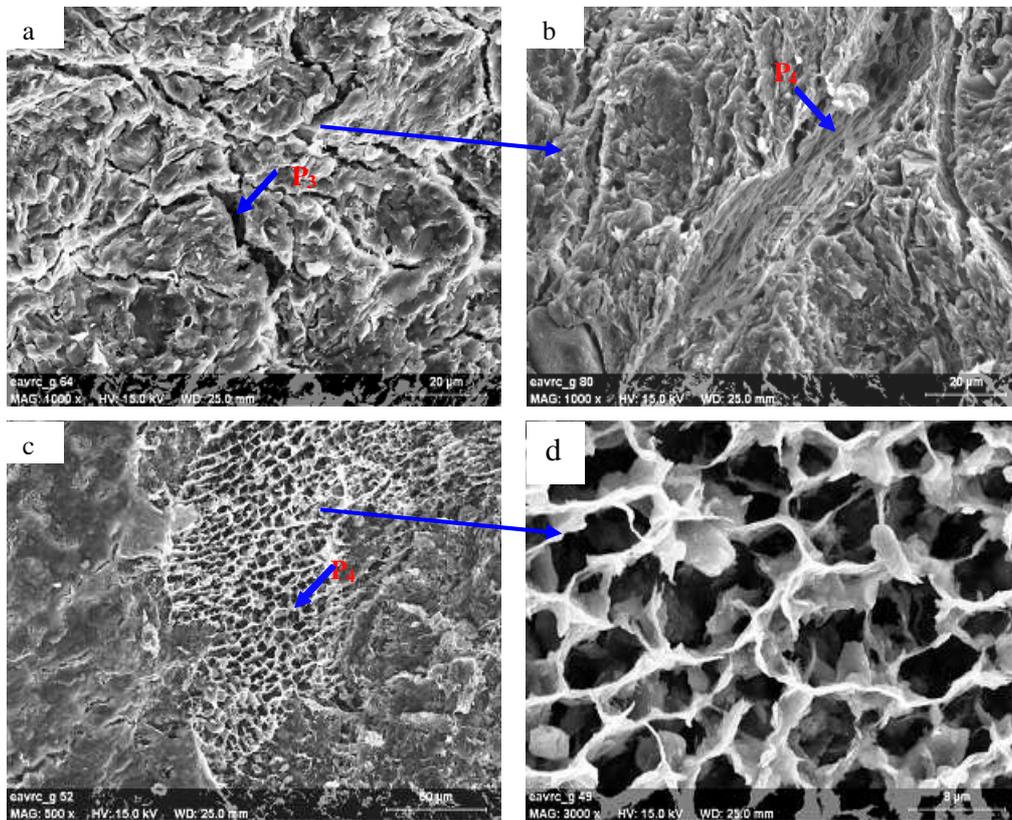


Figure 5.2.11 : Texture d'un Echantillon d'EAVR-C dans le plan du litage, après un cycle de gonflement libre ($w = 41,4\%$)

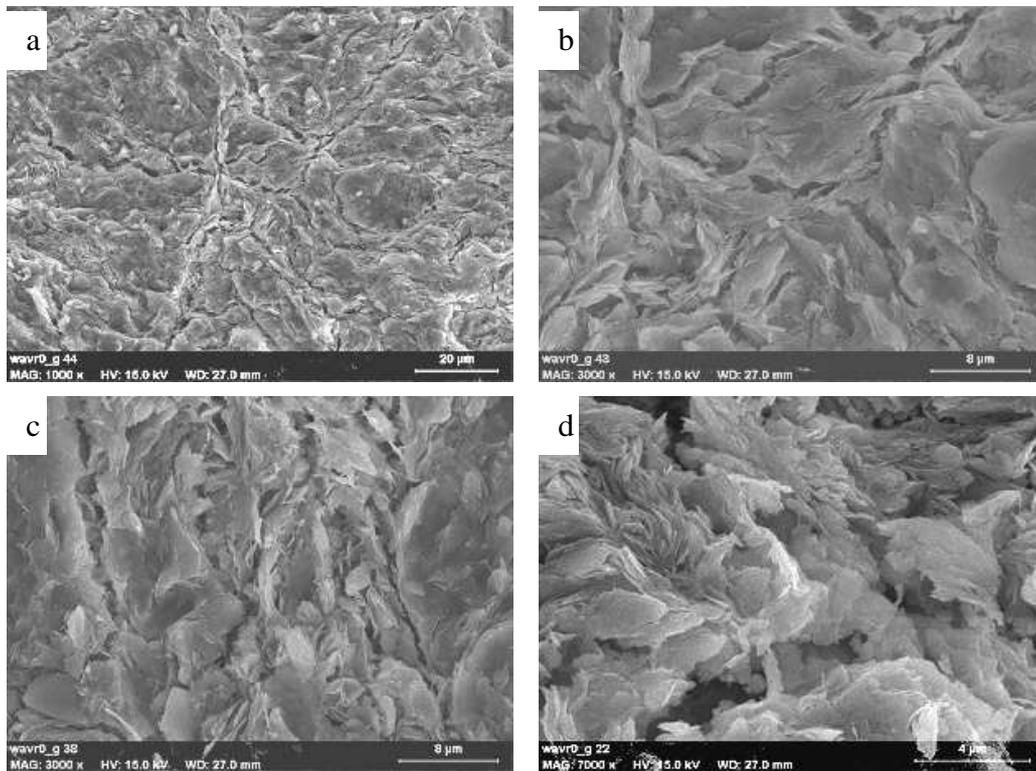
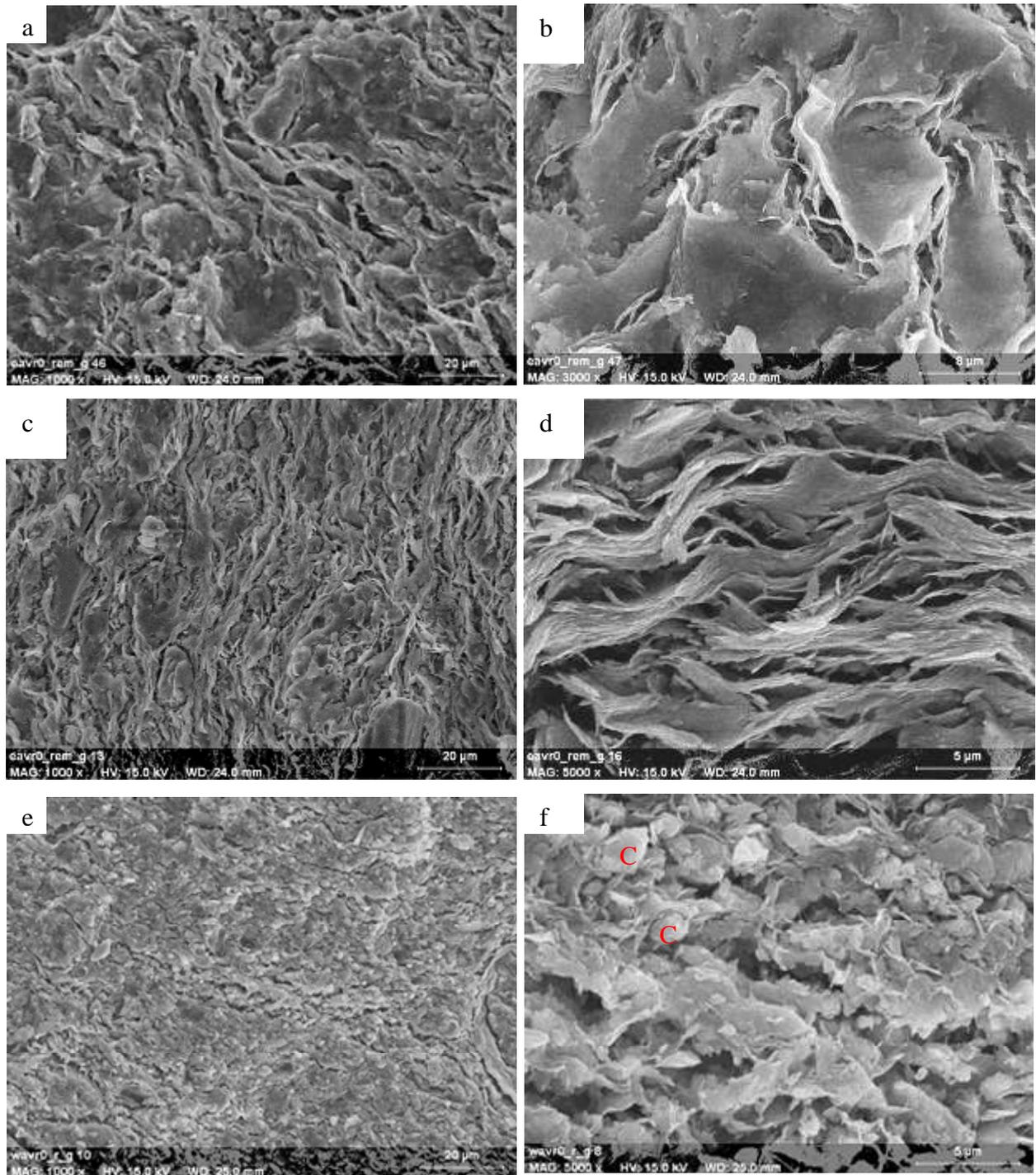


Figure 5.2.12 : Texture d'un Echantillon de WAVR-0 perpendiculaire au plan du litage, après un cycle de gonflement libre



C-calcite

Figure 5.2.13 : Texture d'un échantillon d'EAVR-0 remanié, après un cycle de gonflement libre : dans le plan du dépôt (a, b), perpendiculaire au plan du dépôt (c, d) ; texture d'un échantillon de WAVR-0 remanié après gonflement, perpendiculaire au plan du dépôt

- **Observations au MEB de la microstructure des Argiles vertes de Romainville (EAVR-0) après sollicitations hydriques cycliques (cycles gonflement-retrait)**

Afin d'apprécier l'évolution microstructurale des Argiles vertes de Romainville (EAVR-0) au cours des cycles de gonflement-retrait, cinq échantillons taillés à partir d'un même bloc et soumis à un nombre de cycles imbibition totale-retrait total croissant ont été observés au MEB et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus sur l'échantillon naturel. Les procédures utilisées pour l'essai de gonflement et les caractéristiques de chacun des échantillons sont présentées dans le chapitre 4.

La microstructure de l'échantillon naturel et après un cycle de gonflement est décrite dans les paragraphes précédents. A l'état naturel l'échantillon est caractérisé par une texture laminaire-turbulent dans laquelle l'architecture en agrégats n'apparaît pas. La microstructure est compacte et présente un arrangement préférentiel des particules argileuses parallèlement au litage. Après un cycle de gonflement, l'observation au MEB met en évidence l'ouverture de microfissures de gonflement (porosité bidimensionnelle) qui initient dans la matrice argileuse la formation d'agrégats primaires. La matrice argileuse est encore relativement dense malgré l'apparition d'un réseau de discontinuités. La microstructure du sol n'est donc pas fondamentalement différente à l'exception de la taille des pores qui a augmenté de manière significative lors du gonflement.

L'observation réalisée au MEB, après que l'échantillon ait subi 3 cycles de gonflement (Figure 5.2.14) montre une microstructure initiale encore conservée mais plus aérée qu'après le premier cycle de gonflement. On observe un réseau de microfissures (discontinuités) plus dense, l'épaisseur des microfissures étant de l'ordre de 1 à 2 microns. Elles délimitent des agrégats argileux plus petits (quelques microns) (Figure 5.2.14 c et d). Parallèlement à cela, les cristallites ou amas de particules commencent à se détacher les uns des autres (Figure 5.2.14 a et b).

La microstructure observée après la 5^{ème} phase de gonflement est totalement différente de celle des autres échantillons (Figure 5.2.15 a et b). On observe une texture très aérée et isotrope. L'arrangement initial a disparu et une déstructuration de la microstructure initiale est observée. Elle est marquée par la dissociation des particules argileuses constitutives des agrégats argileux. Les particules argileuses individualisées sont alors prépondérantes dans l'arrangement microstructural, la matrice argileuse est plus lâche (très ouverte) avec des pores de forme et de taille différentes allant jusqu'à 3 microns d'ouverture.

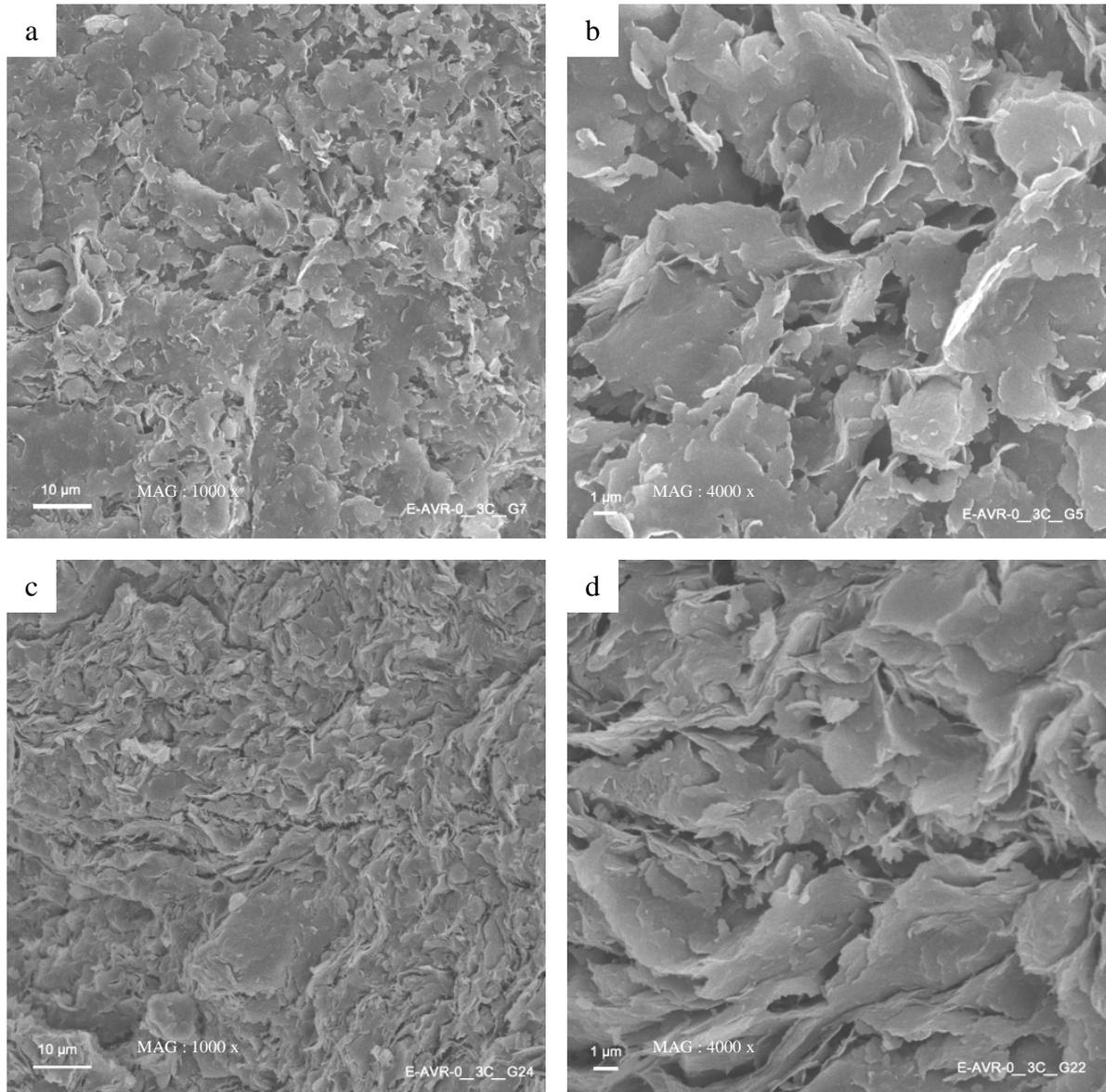


Figure 5.2.14 : Texture d'un échantillon EAVR-0 après 3 cycles de gonflement : a, b, plan du litage ; c, d, perpendiculaire au plan du litage

Après le 5^{ème} cycle de gonflement, les échantillons ont perdu une grande partie de leur cohésion, ce qui entraîne des difficultés pour obtenir des échantillons intacts pour les observations au MEB. Lorsqu'on retire l'échantillon du moule, une partie se désagrège et devient une boue. Ainsi, la portion de l'échantillon prélevée est celle qui présente la cohésion la plus grande. Les observations sont donc faites sur les parties les moins déstructurées et par conséquent minimisent le phénomène global. Les images présentées sur la Figure 5.2.15 (c et d) et sur la Figure 5.2.15 (e et f) montrent respectivement la microstructure d'échantillons après 9 et 11 cycles de gonflement. On observe une microstructure très lâche constituée d'amas argileux et de cristallites individualisés, avec des pores de forme et de taille différentes allant jusqu'à 3 microns d'ouverture.

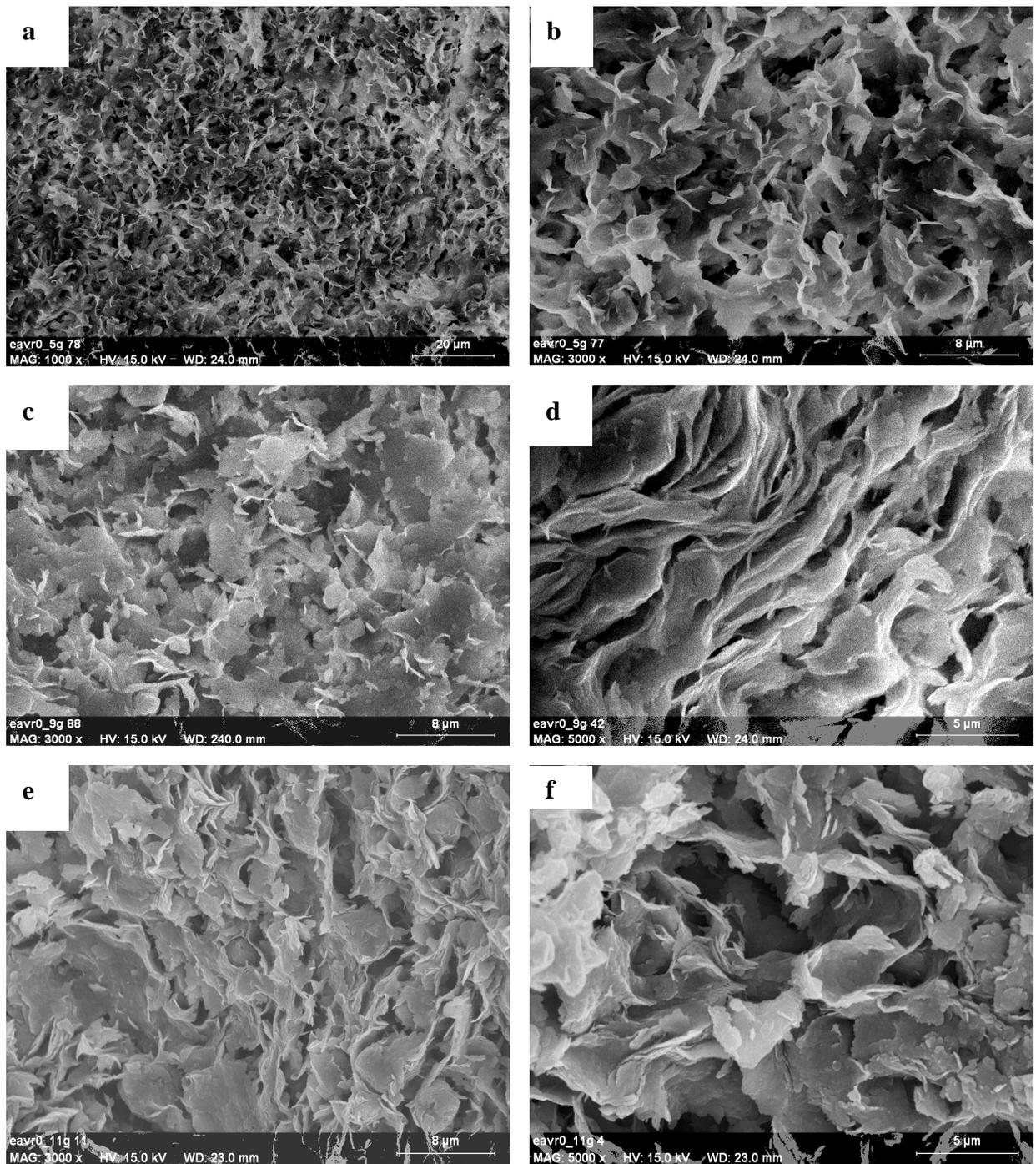


Figure 5.2.15 : Texture d'un échantillon EAVR-0 : a, b après 5 cycles de gonflement ; c, d après 9 cycles de gonflement ; e, f après 11 cycles de gonflement

- **Observations au MEB de la microstructure des Argiles vertes de Romainville (EAVR-0) après un cycle de séchage**

Les images de texture présentées sur la Figure 5.2.16 correspondent à des échantillons d'EAVR-0 soumis à des succions croissantes (état naturel $\sim 1,8$ MPa $\rightarrow 3,1 \rightarrow 29,5 \rightarrow 305$ MPa) sous une contrainte extérieure totale nulle. Les succions supérieures à celle correspondant à l'état initial ($\sim 1,8$ MPa) sont imposées en utilisant des solutions salines. La procédure est décrite précédemment dans le chapitre 2. La microstructure initiale des échantillons naturels (Figure 5.2.4) est si compacte que les résultats obtenus aux succions supérieures, ne montrent pas à l'échelle de nos observations, de différences appréciables sur l'organisation porale des sols étudiés. En effet, Delage et Graham (1995) ont noté qu'à partir d'un certain seuil de succion, les déformations deviennent négligeables et que dans les sols secs l'effet de la succion sur la déformation volumique et la résistance du sol est minimal. Les cavités qu'on voit sur les images sont les emplacements laissés par les grains arrachés lors de la cassure.

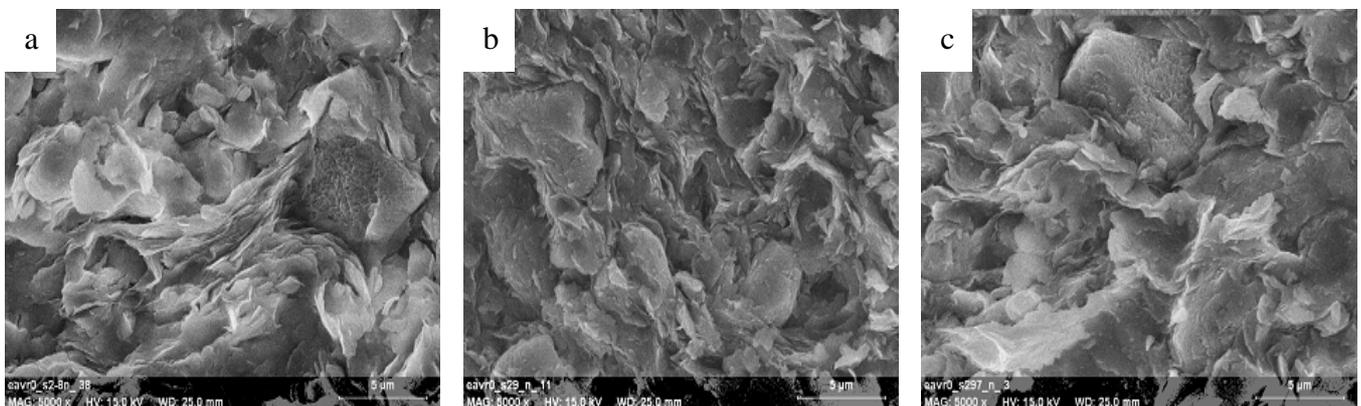


Figure 5.2.16 : Images au MEB des Argiles vertes de Romainville : a) succion 3,1 MPa, b) succion 29,5 MPa, et c) succion 305,5 MPa

- **Considérations sur les résultats obtenus**

Les observations de la microstructure des Argiles vertes de Romainville montrent que la partie inférieure est mieux orientée que la partie supérieure. Les grains non-argileux sont dispersés de façon aléatoire et les carbonates n'ont pas une fonction de liant entre les grains. Ils n'interviennent en fait que comme armature passive. Leur rôle sur le phénomène de gonflement est donc limité. Les différences de comportement au cours du gonflement constatées pour ces matériaux sont donc liées essentiellement aux différences de paramètres physiques. La texture des colluvions est proche de celle de EAVR-1 à l'exception de zones très localisées essentiellement composées de smectites.

L'évolution de la texture au cours de gonflement est très nette. Bien que le degré de modification dépende du taux de gonflement, la texture évolue dans le même sens. Le gonflement résulte de l'ouverture de discontinuités déjà existantes ou du développement de microfissures. Ainsi les amas argileux se divisent et leur taille se réduit au cours de gonflement. Le processus de gonflement est contrôlé par l'ouverture de fissures successives, qui augmentent en nombre et en taille à chaque nouveau cycle d'imbibition-séchage. Au cours des cycles successifs on observe une évolution vers une texture isotrope avec augmentation de la taille et du volume poreux.

5.2.4.1.b *Les Marnes bleues d'Argenteuil*

Rappelons brièvement que les Marnes bleues d'Argenteuil contiennent des carbonates majoritairement, du quartz, des traces de pyrite et des minéraux argileux (de l'illite en majorité, des smectites et en plus faible proportion de la kaolinite). Les Marnes bleues d'Argenteuil possèdent une proportion de smectite relativement plus importante que l'Argile verte de Romainville et une granulométrie fine (78 à 90 % < 2 µm).

Sur la Figure 5.2.17 à la Figure 5.2.28 sont représentées les images prises au MEB, suivant le plan du litage et/ou perpendiculairement au litage, des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil naturels (EMB-1, EMBA-01, EMBA-0) remaniés et après gonflement.

- **Caractérisation préalable de la microstructure des Marnes bleues d'Argenteuil à l'état naturel ou remanié**

Sur la Figure 5.2.17 sont représentées les images prises au MEB, suivant le plan du litage, d'un échantillon d'EMBA-1 intact dont la teneur en eau naturelle est de 23,3 %. On observe que la texture de ces sols est non-orientée, compacte, et relativement hétérogène (Figure 5.2.17 a). Elle s'apparente au type de microstructure en squelette, mais avec par endroit des zones de type matriciel. Le matériau contient de la calcite en forte proportion (teneur en carbonate 60 %) et, par endroit, on voit des grains de carbonates cimentés mais peu d'association avec des argiles (Figure 5.2.17 c). Dans certaines zones, on observe des assemblages en agrégats formés par des grains de calcite jointifs, des grains de calcite isolés mais aussi emballés par des argiles. La proportion d'argiles varie de façon aléatoire. Globalement, les argiles sont disséminées dans le matériau et se trouvent pincées entre des grains de calcite ou dans des micropores délimitées par des réseaux de calcite (Figure 5.2.17 b). On observe la présence de pyrite framboïdale (Figure 5.2.17 d). Il est difficile d'apprécier clairement la porosité, on observe quelques pores situés entre les petits amas de grains de carbonates, ainsi que d'autres pores bidimensionnels mais peu développés ; leur diamètre est généralement inférieur à 0,3 µm (Figure 5.2.17 b et c).

Les observations au MEB d'un échantillon EMBA-01 (teneur en eau de 27 %, teneur en carbonate de 44 %) montrent une texture préférentiellement orientée, poreuse (Figure 5.2.18 a, c) et hétérogène. Par endroit, on observe des concentrations (forte proportion) de grains de calcite et de quartz qui rendent compte de l'hétérogénéité du sédiment à dominante détritique (Figure 5.2.18 b et d). La pyrite framboïdale est présente également dans le sol comme on peut l'observer sur la Figure 5.2.18 e. Elle est beaucoup plus dispersée sur cet échantillon que sur l'échantillon EMBA-1 et souvent intimement associée à des argiles ou des micas. Sur la Figure 5.2.18 f, on observe un fragment de fossile d'organisme composé par de la calcite micritique. On observe des pores au contact grains (pyrite, calcite, quartz)-argiles (Figure 5.2.18 f) et à l'intérieur d'amas de calcite ou de quartz de taille inférieure au micron (Figure 5.2.18 b, d). Sur le plan perpendiculaire au litage on observe la présence de discontinuités (microfissure ouverte), son diamètre est inférieure à 0,5 µm (Figure 5.2.18 c).

Les images au MEB d'un échantillon d'EMBA-0 (teneur en eau 37 %, teneur en carbonate 64 %) présentées sur la Figure 5.2.19 montrent que cette marne est formée de grains de calcite emballés dans un tissu argileux à dominante fibreuse principalement de l'attapulгите (Figure 5.2.19). Dans certaines zones (Figure 5.2.19 e, f), on observe des amas de grains de calcite cimentés. La microstructure est plus lâche dans les zones où la présence d'attapulгите est plus

marquée, et où les fibres s'individualisent. Dans le plan perpendiculaire au litage, on observe une microstructure préférentiellement orientée et poreuse (Figure 5.2.19 c, d). Les pores observés sont intergranulaires (entre les grains de calcite) et en partie occupés par les fibres d'attapulгите (Figure 5.2.19 b, f), leur diamètre semble généralement inférieur à $0,3\ \mu\text{m}$.

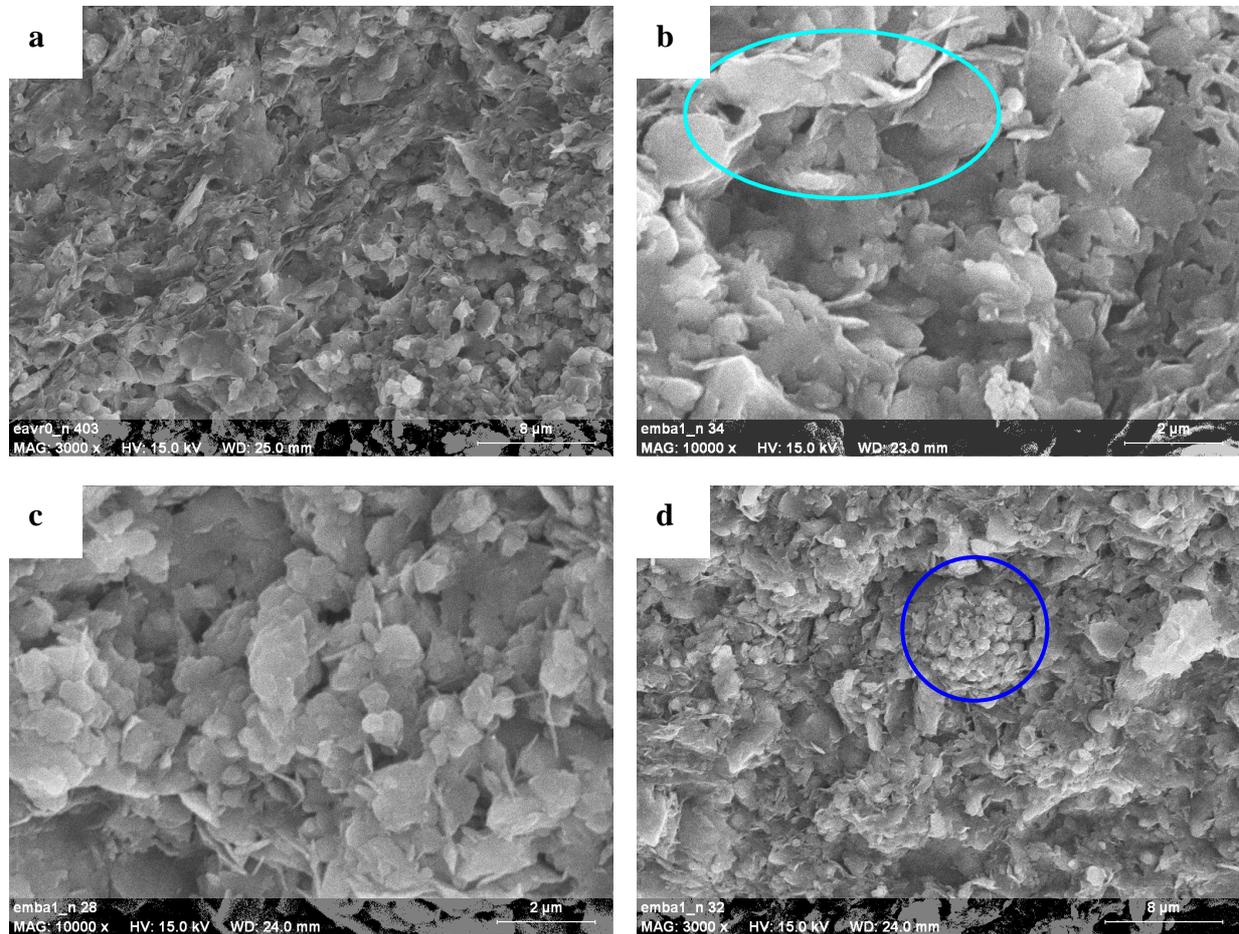


Figure 5.2.17 : Texture d'un échantillon EMBA-1 dans le plan du litage a) vue globale, b) associations calcite-argiles, c) grains de calcite micritique, d) pyrite framboïdale

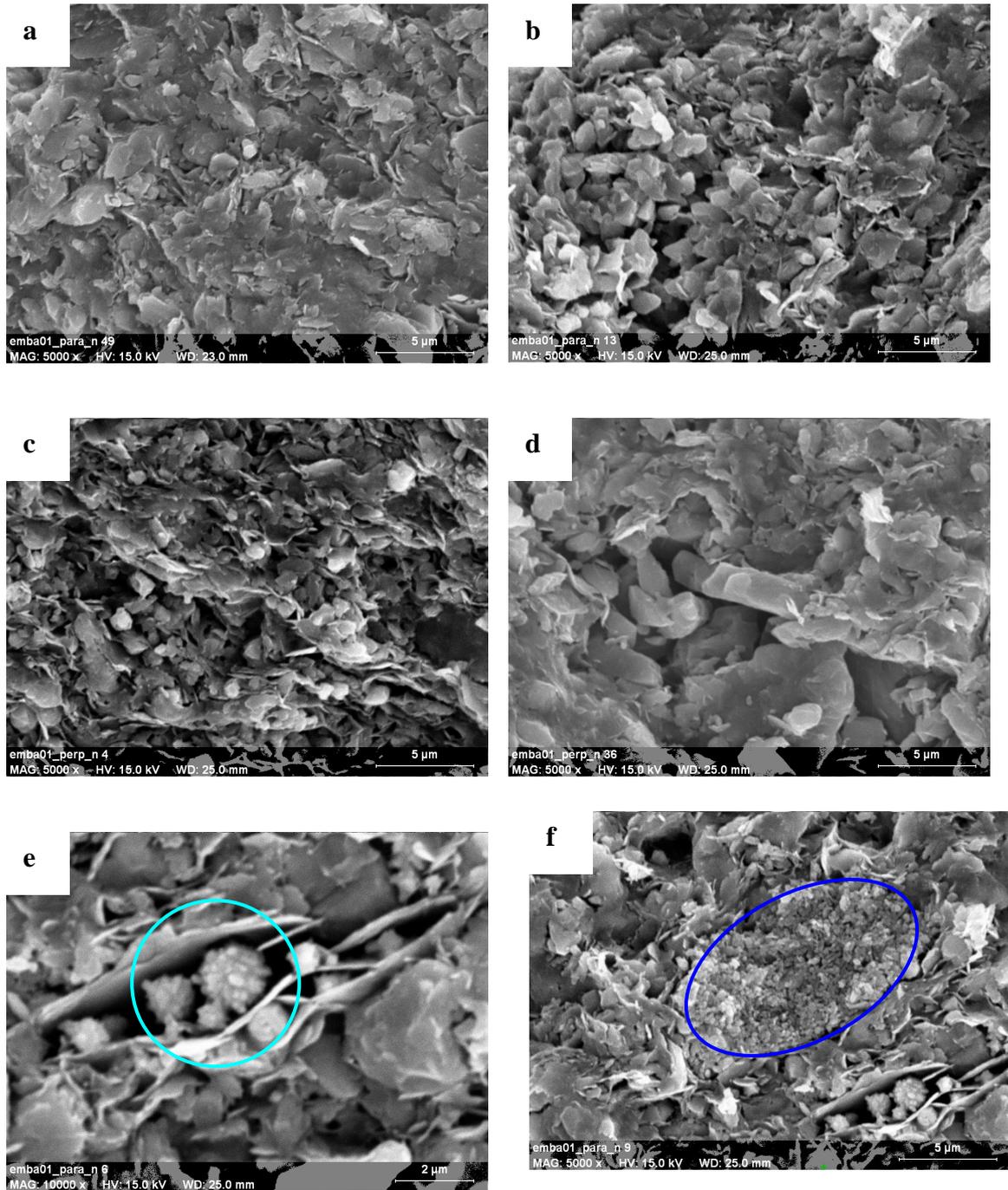


Figure 5.2.18 : Texture d'un échantillon d'EMBA-01 dans le plan du litage (a, b, e, f) et perpendiculaire au plan du litage (c, d) : a) vue globale dans le plan du litage, b) grains de calcite individualisés c) vue globale perpendiculaire à la stratification d) zone dominée par le quartz, e) pyrite framboïdale, f) fragments de test d'organismes

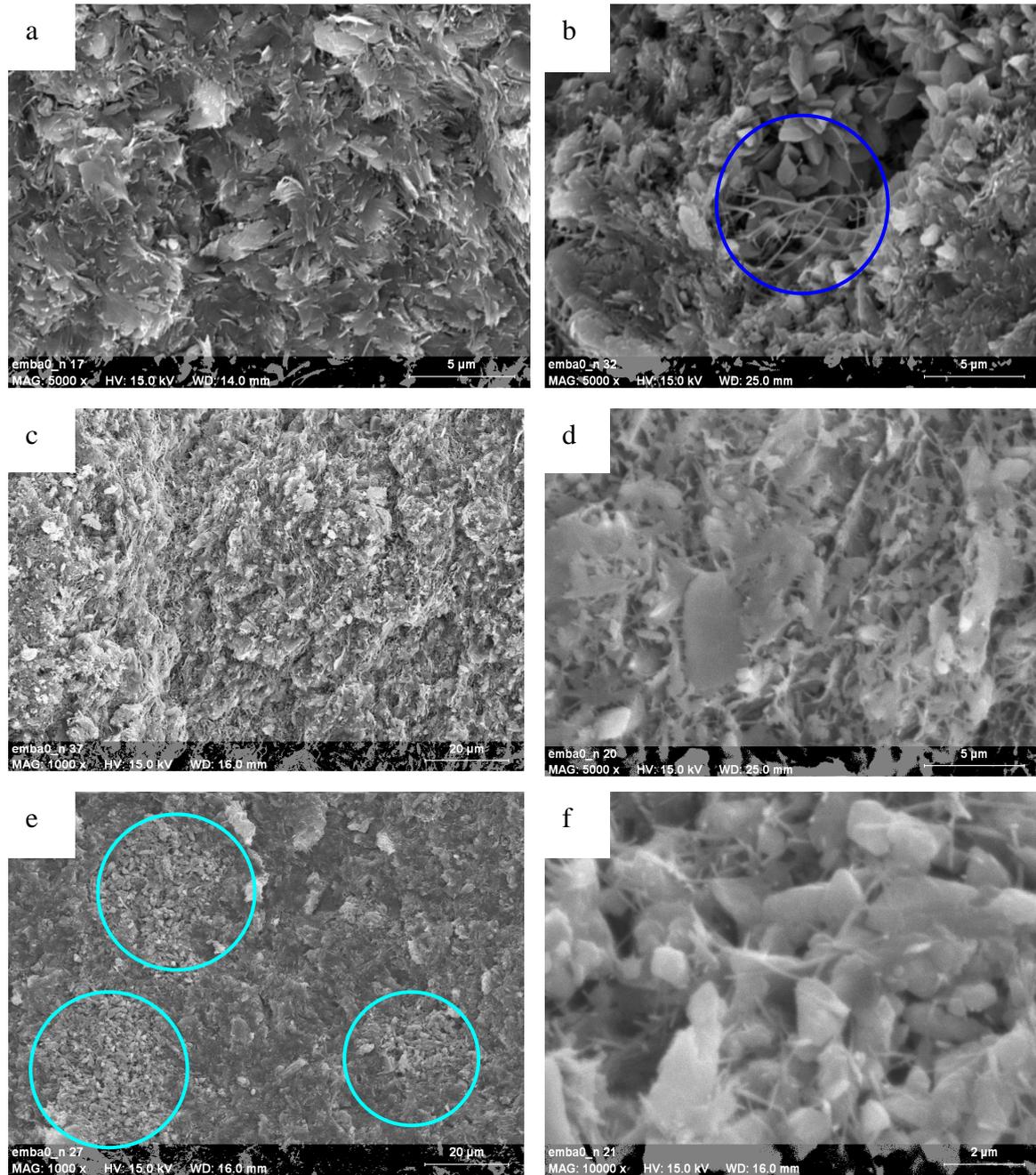


Figure 5.2.19 : Texture d'un échantillon d'EMBA-0 dans le plan du litage (a, b) et perpendiculaire au plan du litage (c à f) : a) vue globale dans le plan du litage, b) argiles fibreuses, c) vue globale perpendiculaire à la stratification, d) détail de l'image c, e) amas, de grains de calcite cimentés, f) détail de l'image e

Pour l'échantillon EMBA-1 remanié dont la teneur en eau est de 24 % et composé à 56 % de carbonate (Figure 5.2.20), la texture apparaît assez irrégulière, d'aspect dense, sans orientation préférentielle. La comparaison des observations dans les plans perpendiculaire et parallèle au litage n'a pas mis en évidence de différence d'arrangement : ce sol ne présente donc pas d'anisotropie décelable (Figure 5.2.20 a, b). On observe des grains de calcite dispersés dans une matrice argileuse, mais dans certaines zones l'agrégation des grains de calcite est plus

marquée et ils ne présentent aucun lien avec les argiles (Figure 5.2.20 c). Localement, on observe des amas d'argiles illite-smectite dispersés. Sur la figure (Figure 5.2.20 d), des sphérules de pyrite (diamètre environ 1 μm) sont observées. Les pores sont situés entre les grains de calcite, au contact grain-argile et entre les sphérules de pyrites (Figure 5.2.20 b, c, d). Ils sont de forme le plus souvent sub-sphérique et leur diamètre semble généralement inférieur à 0,5 μm .

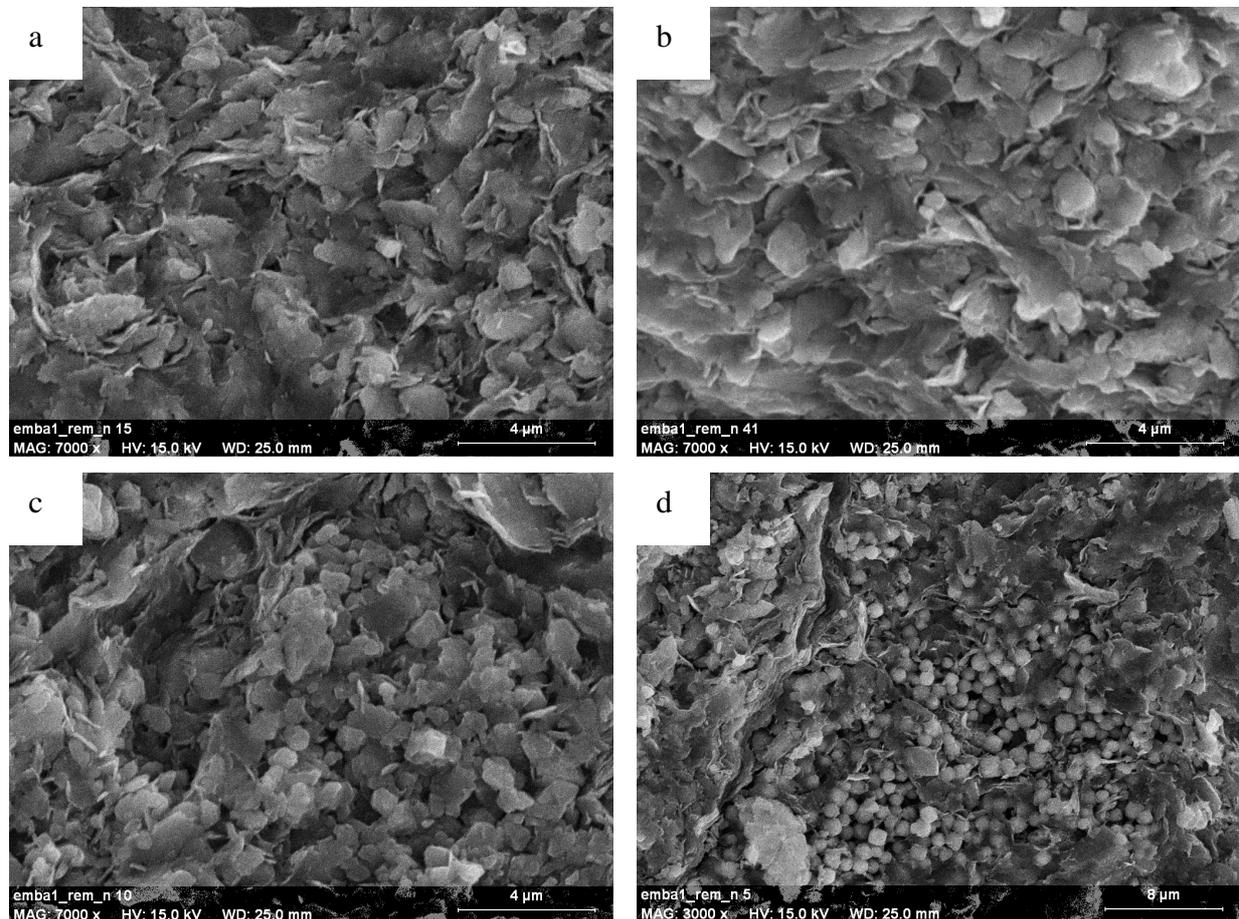


Figure 5.2.20 : Texture d'un échantillon d'EMBA-1 remanié avant essai de gonflement: a) vue globale dans le plan du dépôt, b) vue globale perpendiculaire au plan du dépôt c) agrégation de grains de calcite d) pyrite en forme de sphérules

L'observation au MEB d'un échantillon EMBA-01 remanié (teneur en eau de 27 %, teneur en carbonate de 46 %) avant le gonflement (Figure 5.2.21) montre une texture compacte, constituée d'une matrice argileuse dans laquelle des grains de calcite et de quartz sont dispersés de façon aléatoire (Figure 5.2.21 a, b). Globalement, l'orientation des particules n'est pas évidente, mais localement une orientation préférentielle parallèle au plan de dépôt peut-être observée (Figure 5.2.21 c). Elle est due à des amas argileux allongés, d'épaisseur comprise entre 2 et 3 μm et de longueur allant jusqu'à 30 μm , (Figure 5.2.21 c). Aucun réseau continu ou d'agrégats de grains de calcite n'a été observé. Par contre, de la pyrite framboïdale et des fragments de squelette d'organismes carbonatés sont présents (Figure 5.2.21 d). Les pores observés, de forme allongée, sont situés entre les particules argileuses ou amas argileux et au contact calcite-argiles (Figure 5.2.21 c), leur diamètre semble généralement inférieur à 0,2 μm .

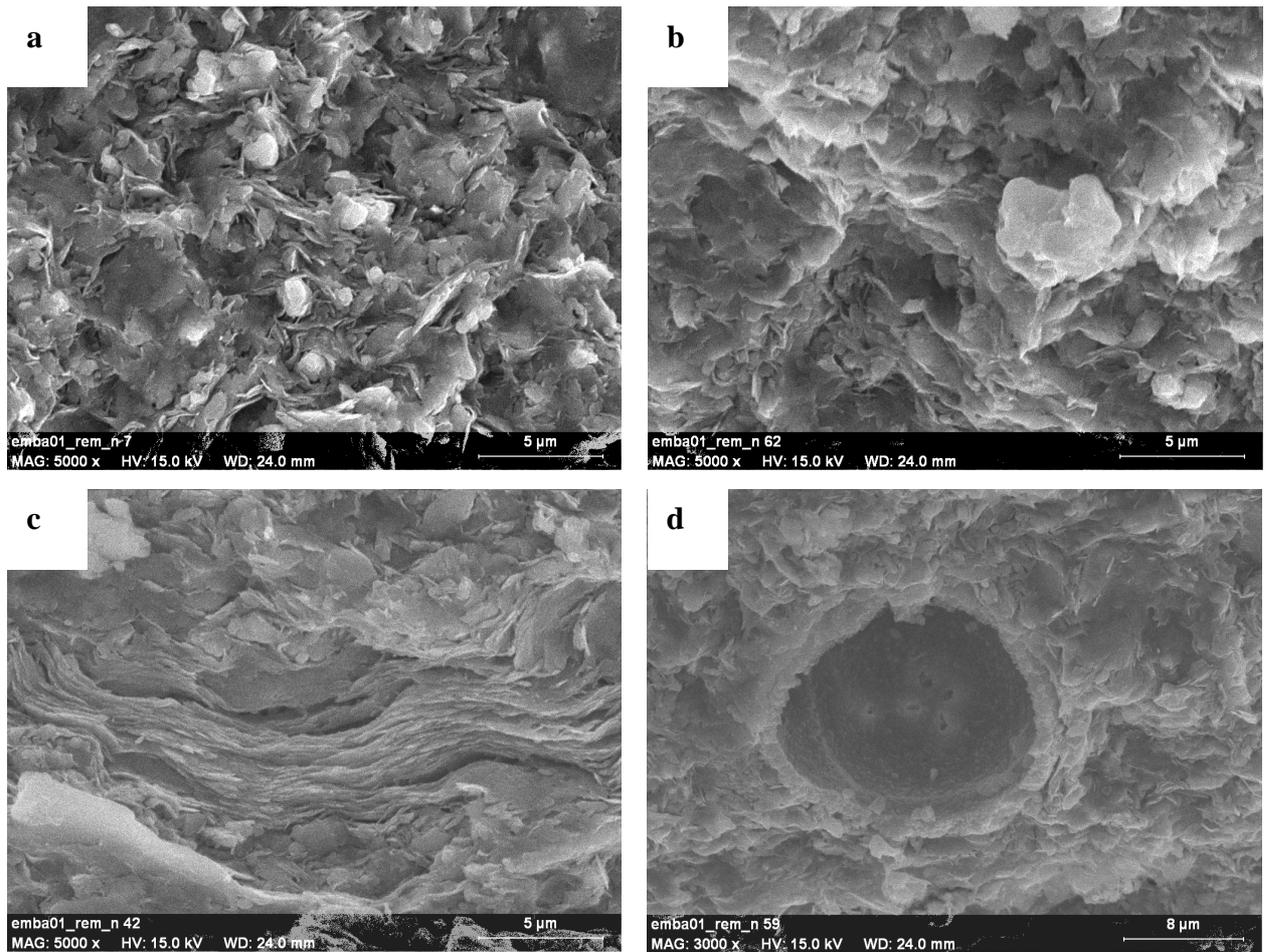


Figure 5.2.21 : Texture d'un échantillon d'EMBA-01 remanié avant essai de gonflement: a) vue globale dans le plan du dépôt, b) vue globale perpendiculaire au plan du dépôt c) amas d'argile d) fragments de tests d'animaux

Pour les Marnes bleues inférieures remaniées (EMBA-0 remanié, teneur en eau 35 %, teneur en carbonate de 63 %), nous observons une microstructure orientée et assez irrégulière (Figure 5.2.22). Dans l'ensemble on observe une ségrégation entre les grains de calcite et les argiles fibreuses, sous forme de lits de nature différente, mais il existe des zones où les grains de calcite sont encore emballés dans un tissu d'argiles fibreuses (Figure 5.2.22 c). Dans d'autres zones, les grains de calcites sont totalement séparés des argiles (Figure 5.2.22 d), ou bien les argiles subsistent quasiment seules sans calcite (Figure 5.2.21 b). Contrairement à l'échantillon intact, il n'existe pas un squelette de calcite englobant les argiles. Les pores observés sont situés au contact entre les lits argileux et les grains de calcite, et entre grains de calcite (Figure 5.2.22 c, d); leur diamètre semble généralement inférieur à 0,5 μm .

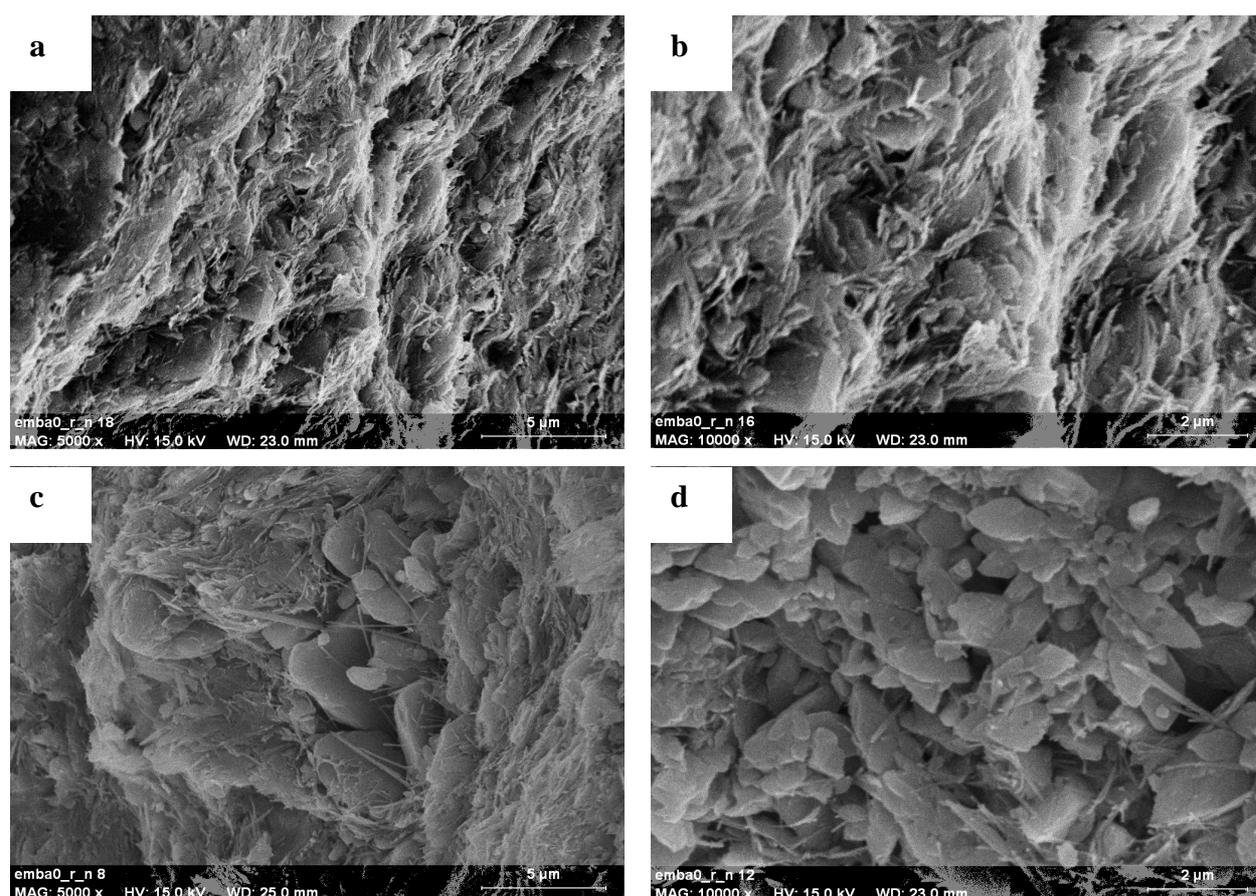


Figure 5.2.22 : Texture d'un échantillon d'EMBA-0 remanié avant essais de gonflement : a) vue globale perpendiculaire au plan du dépôt, b) détail de l'image a, c) présence de calcite emballée dans des argiles fibreuses, d) amas de grains de calcite

○ **Observations au MEB des microstructures correspondantes après un cycle de gonflement**

Les observations réalisées au MEB, après que l'échantillon naturel d'EMBA-1 ait subi un cycle de gonflement (taux de gonflement de 1,2 %, $w_f = 25$ %), montrent qu'un seul cycle ne provoque pas de perturbations significatives sur la texture de ce sol (Figure 5.2.23). On observe une texture originelle bien conservée, à l'exception de quelques microfissures (de diamètre inférieur à 0,5 μm) dans le plan horizontal et vertical (Figure 5.2.23 a et b). Une observation détaillée de ces microfissures montre que l'ouverture se fait à la faveur d'amas

argileux (Figure 5.2.23 c). La pyrite framboïdale (Figure 5.2.23 d) ne présente pas d'altération.

Après une phase de gonflement, l'échantillon EMBA-01 est celui qui présente le gonflement le plus fort parmi les échantillons intacts de Marnes bleues d'Argenteuil étudiés (taux de gonflement de 10 %, teneur en eau finale de 36,5 %). Les images présentées sur la Figure 5.2.24 en témoignent. On observe une texture originelle conservée avec quelques légères modifications. Par endroit, les liens entre grains non-argileux et argiles sont détruits (Figure 5.2.24 d). On observe également l'apparition de microfissures perpendiculaires au plan du litage (Figure 5.2.24 a) et par ouverture du litage (Figure 5.2.24 b). Dans certaines zones le sol semble présenter une texture plus compacte que celle de la texture originelle (Figure 5.2.24 c).

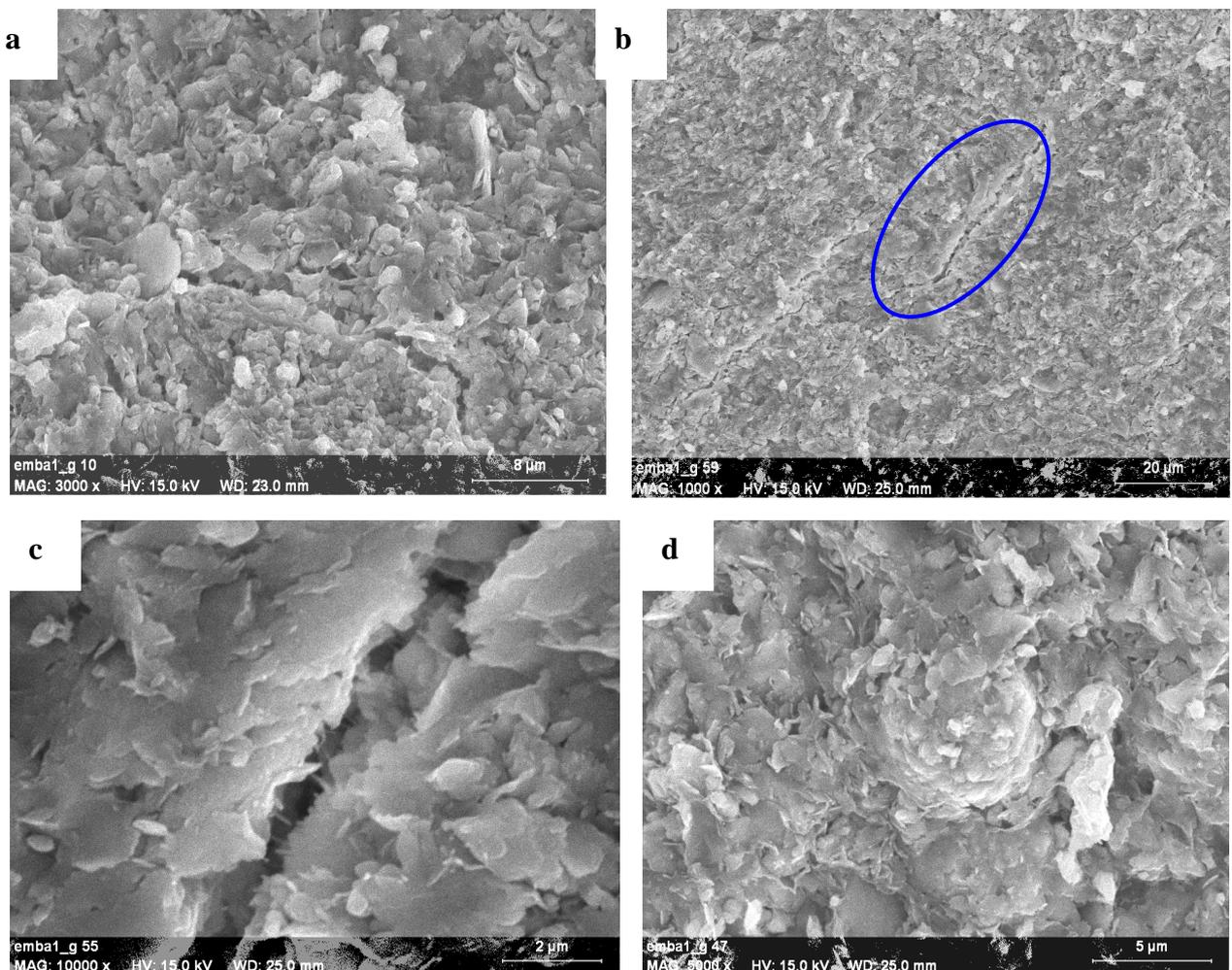


Figure 5.2.23 : Texture d'un échantillon d'EMBA-1 naturel après un cycle de gonflement: a) vue globale parallèle au plan du litage, b) vue globale perpendiculaire au plan du litage c) détail de microfissure observée sur l'image b, d) présence de pyrite framboïdale non altérée

La présence de bioclastes associés à des argiles et des grains de calcite est observée sur la Figure 5.2.25 a. On remarque de la pyrite framboïdale associée à des corps organiques sur la Figure 5.2.25 b et au gypse sur Figure 5.2.25 c et d. Cette association n'est pas anormale. En

effet, la formation de pyrite framboïdale est souvent associée à un remplissage de bulles de gaz, ou même à la substitution de corps organiques préexistants par de la pyrite autigénique (O'Brien & Slatt, 1990 cité par Pejon et al., 1997). De plus, l'oxydation de la pyrite conduit à la formation d'acide sulfurique qui peut réagir avec la calcite et donner naissance au gypse (Taylor, 1988) et peut provoquer le gonflement. Selon Rakotonratsima et al. (1993 cité par Pejon et al., 1997), la transformation de la pyrite en gypse provoque une augmentation de volume de 103 % avec une pression de cristallisation de 75 kN/m².

Les vides observés sont donc situés entre les grains (calcite et quartz), au contact grains-argiles et sous forme de microfissures (diamètre inférieur à 1 µm). Il existe aussi des pores dus à l'existence dans le matériau de nombreux fossiles et de nids de pyrite (diamètre des pores allant de 4 à 8 µm voir plus).

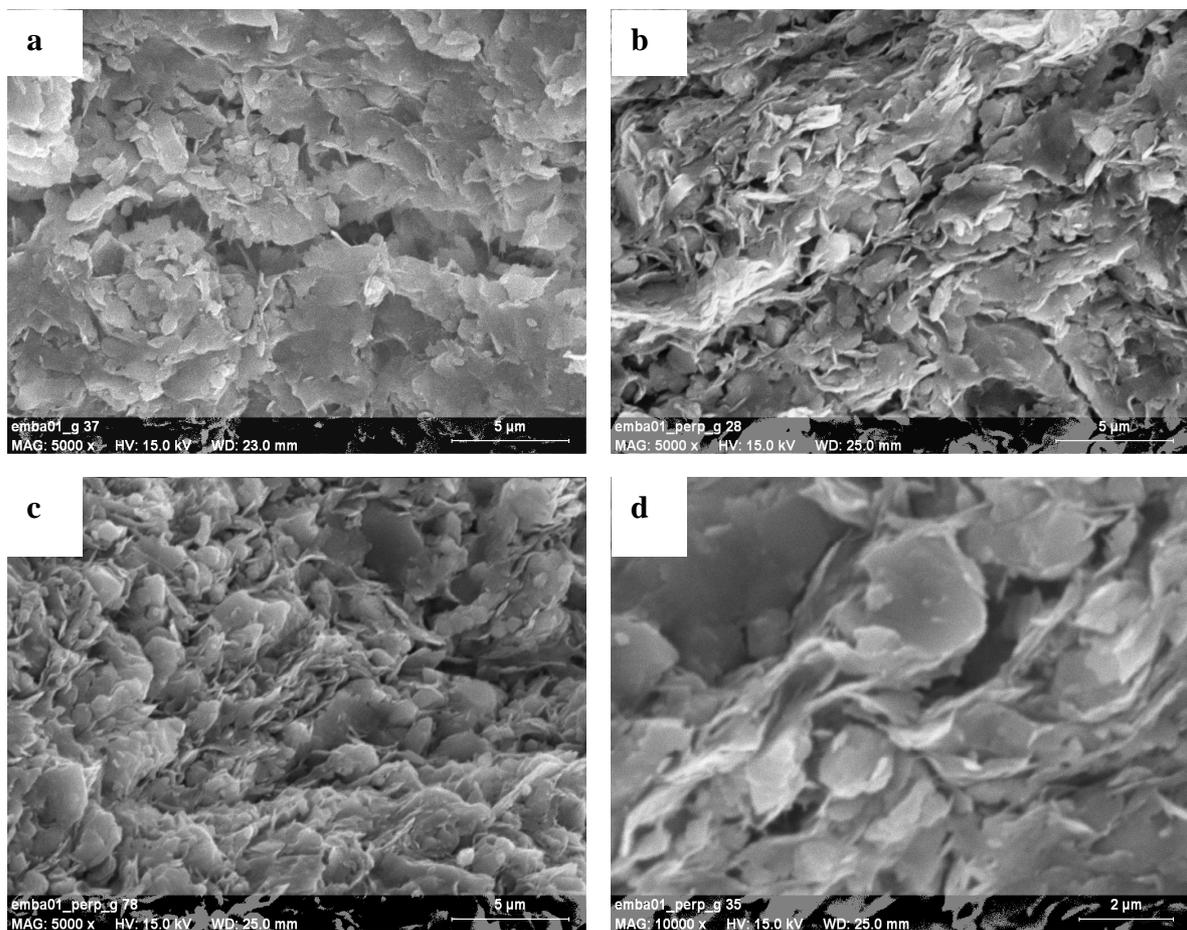


Figure 5.2.24 : Texture d'un échantillon d'EMBA-01 naturel après un cycle de gonflement: a) vue globale parallèle au plan du litage, b et c) vue globale perpendiculaire au plan du litage c) zone plus compacte perpendiculaire au plan du litage, d) ouverture de la porosité grain-argiles

Les observations réalisées sur l'échantillon EMBA-0 après gonflement (taux de gonflement de 2,5 %, $w_f = 40$ %), montrent qu'un cycle de gonflement ne provoque pratiquement pas, de déformations visibles de la texture de l'échantillon. Seules l'apparition de quelques microfissures est notée (Figure 5.2.26 a, c), d'épaisseur inférieure à 0,5 μm , dans les zones où la présence d'argiles est plus marquée (Figure 5.2.26 b). Les zones environnant ces fissures montrent une porosité un peu plus ouverte (Figure 5.2.26 d).

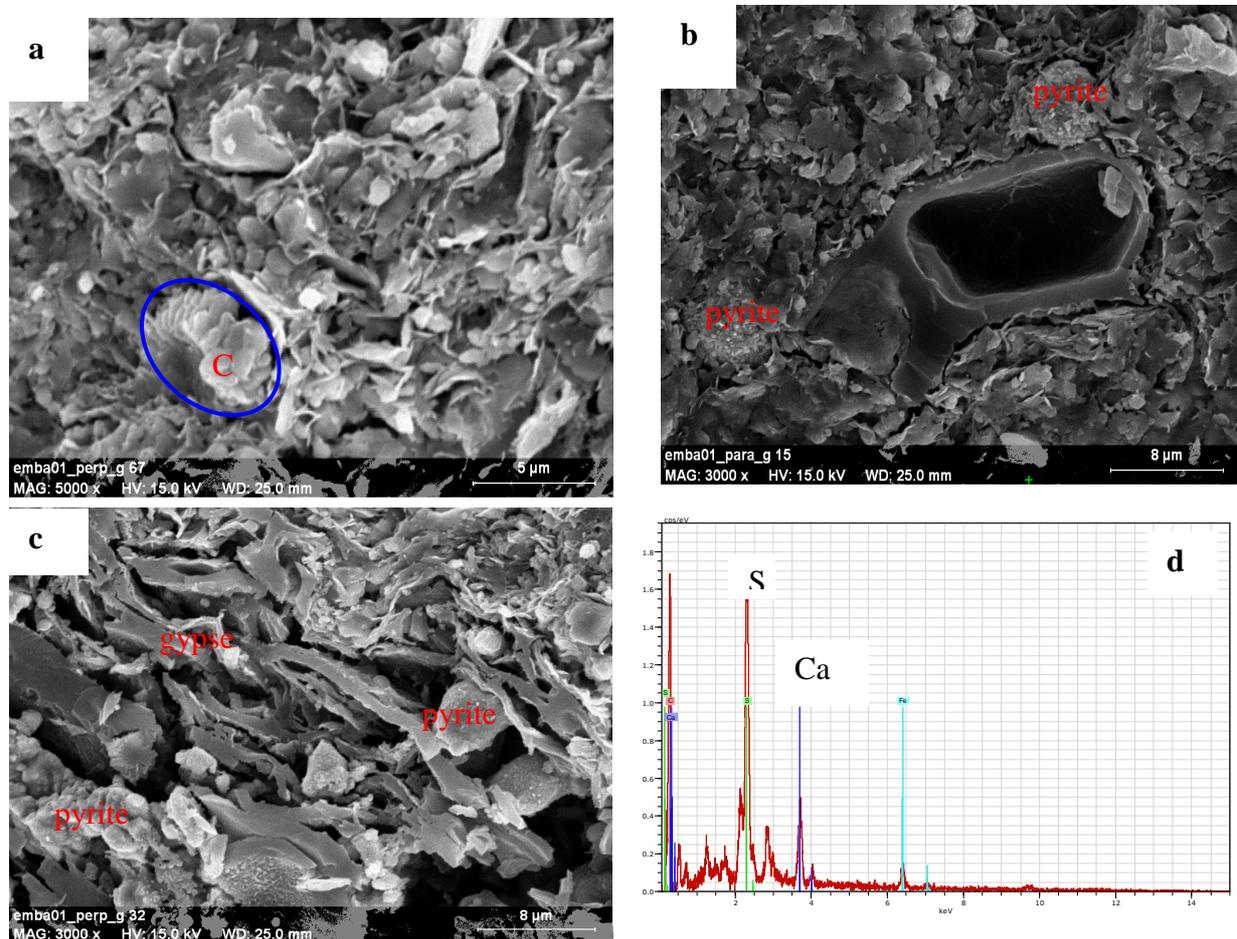


Figure 5.2.25 : Texture de l'échantillon d'EMBA-01 naturel après un cycle de gonflement: a) présence de bioclaste, b) présence de pyrite framboïdale associée à des fragments d'organisme c) présence de pyrite associée au gypse d) spectre du gypse

Sur la Figure 5.2.27 sont présentées les images après essai de gonflement des trois sols remaniés. L'évolution de la microstructure au cours du gonflement est très nette. En effet, au départ elle est relativement serrée et dense puis, avec le gonflement, il y a création d'ouvertures entre les feuillets argileux qui composent les zones ou amas argileux.

La Figure 5.2.27 a et b, montrent la texture de l'échantillon EMBA-1 remanié après gonflement (taux de gonflement de 15 %, $w_f = 35$ %). On observe une texture matricielle, plus aérée que pour l'échantillon naturel, avec des ouvertures de pores dans les amas argileux créant ainsi des réseaux de fissures délimitant des agrégats composés de grains de calcite et d'argiles dont la taille est d'une trentaine de microns, voire plus. Le diamètre des ces fissures semble inférieur à 1 μm . On observe également une porosité interagrégat grains-grains ou grains-argiles, dont le diamètre est inférieur à 0,5 μm .

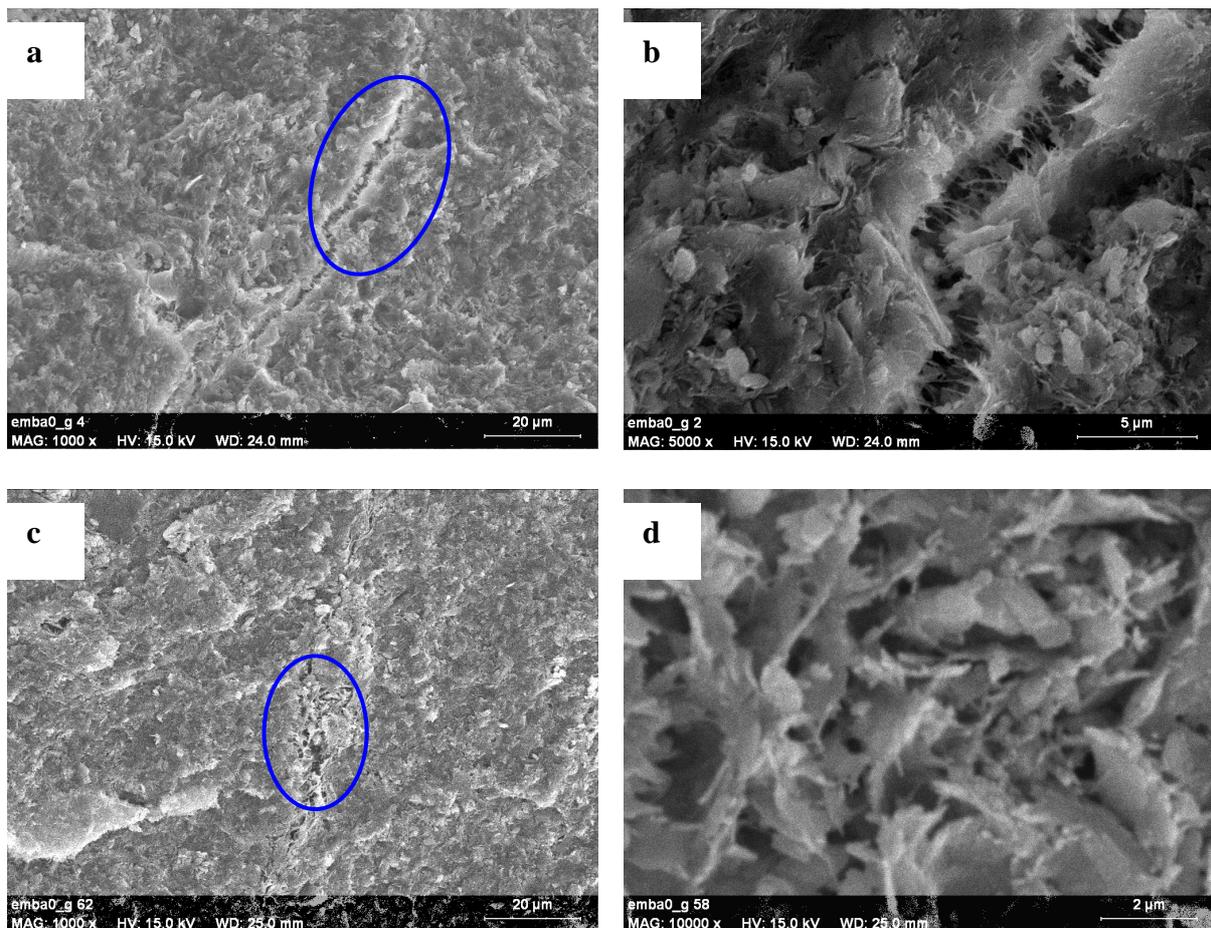


Figure 5.2.26 : Texture d'un échantillon d'EMBA-0 naturel après un cycle de gonflement: a) vue globale parallèle au plan du litage, b) détail d'une microfissure de l'image a, c) vue globale perpendiculaire au plan du litage, d) détail de la zone de microfissure de l'image c

L'observation microscopique de l'échantillon EMBA-01 remanié après gonflement (taux de gonflement de 24 %, $w_f = 45$ %) montre que la texture initiale est conservée mais est devenue très lâche (Figure 5.2.27 c, d). On observe l'apparition de nombreuses ouvertures dans la matrice argileuse dans laquelle des grains de carbonates sont dispersés de façon aléatoire. Par endroit, ces ouvertures délimitent des agrégats, composés de grains de carbonate et d'argiles, de taille de 1 à 15 μm . Dans certaines zones, on observe des grains de calcite agrégés, et dans d'autres des pores situés dans la matrice argileuse très ouverte, leur taille est inférieure à 2 μm .

Dans le cas du sol EMBA-0 remanié après gonflement (taux de gonflement de 18 %, $w_f = 52$ %), l'observation au MEB montre une modification de la texture initiale. La texture est très lâche, composée d'argiles fibreuses dans lesquelles sont noyés d'autres particules argileuses et des grains de calcite isolés et plus dispersés. Dans certaines zones, on voit des agrégats de grains de calcite. Les pores observés sont situés dans les réseaux argileux et entre les grains de calcite, et leur diamètre est généralement inférieur à 2 μm .

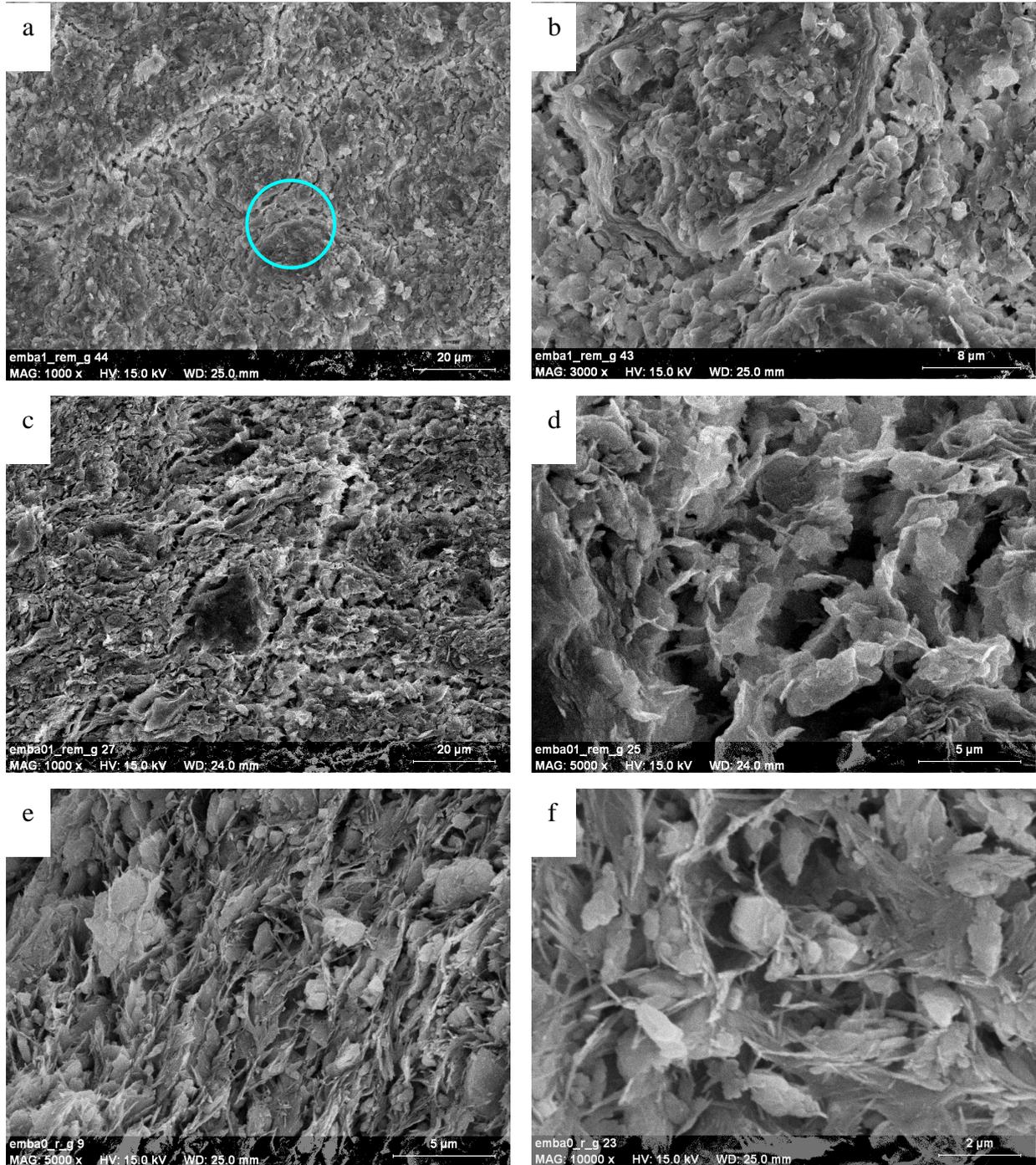


Figure 5.2.27 : Texture d'échantillons remaniés perpendiculaire au plan du dépôt après un cycle de gonflement: EMBA-1 remanié (a, b), EMBA-01 remanié (c, d), et EMBA-0 remanié (e, f)

- **Observations au MEB des microstructures de Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-1) après plusieurs sollicitations hydriques (gonflement-retrait) cycliques**

On a observé précédemment que la microstructure de l'état initial de EMBA-1 est compacte et hétérogène. Des assemblages en agrégats formés par des grains de calcite jointifs, mais

aussi emballés dans des argiles sont visibles. Les observations réalisées au MEB après le 1^{ère} cycle de gonflement montrent que la microstructure initiale est bien conservée et qu'une seule phase de gonflement dont le taux est relativement faible n'a pas provoqué de perturbations significatives sur la microstructure du sol.

Après 4 phases de gonflement (Figure 5.2.28 a, b), la structure reste encore relativement dense malgré l'apparition d'un réseau de discontinuités dû au gonflement des argiles localisées entre les agrégats carbonatés. La microstructure du sol n'est donc pas fondamentalement différente. Cette observation renforce l'idée de l'existence d'un squelette rigide qui s'oppose partiellement au gonflement. Les différences par rapport à l'état initial sont : la dimension des agrégats qui semble un peu plus réduite, et la taille des pores qui a augmenté. Cependant cette modification structurale reste très localisée et des agrégats de quelques dizaines de micromètres sont encore visibles.

Après 6 cycles de gonflement (Figure 5.2.28 c, d), même si la microstructure initiale est encore discernable, son évolution est plus marquée et elle passe à un arrangement en agrégats de quelques microns nettement séparés par des pores bidimensionnels. Les faibles variations de volume enregistrées pour EMBA au cours des cycles de gonflement-retrait, ne permettent pas des modifications structurales aussi importantes que celles observées pour EAVR.

○ **Considérations sur les résultats obtenus**

Les observations au MEB faites sur les sols intacts et remaniés montrent que, dans les marnes, la relation argiles-carbonate joue un rôle important. Les minéraux argileux peuvent se présenter sous deux configurations différentes :

- soit ils sont disséminés dans le matériau et peuvent se trouver emprisonnés ou pincés entre les grains de calcite ou dans des micropores délimités par un réseau de calcite très dense ;
- soit ils sont libres et donc facilement mobilisables au sein de la matrice carbonatée.

Dans le premier cas le gonflement des argiles est empêché, ou reste limité et localisé au volume des pores créé par les liaisons entre grains de calcite et de ce fait n'a que peu de répercussions à l'échelle macroscopique. Cela semble être le cas pour EMBA-1 et EMBA-0 intacts.

Dans le second cas, en présence d'eau, les argiles peuvent exprimer pleinement leurs propriétés de gonflement. C'est le cas pour EMBA-01 et pour les sols remaniés.

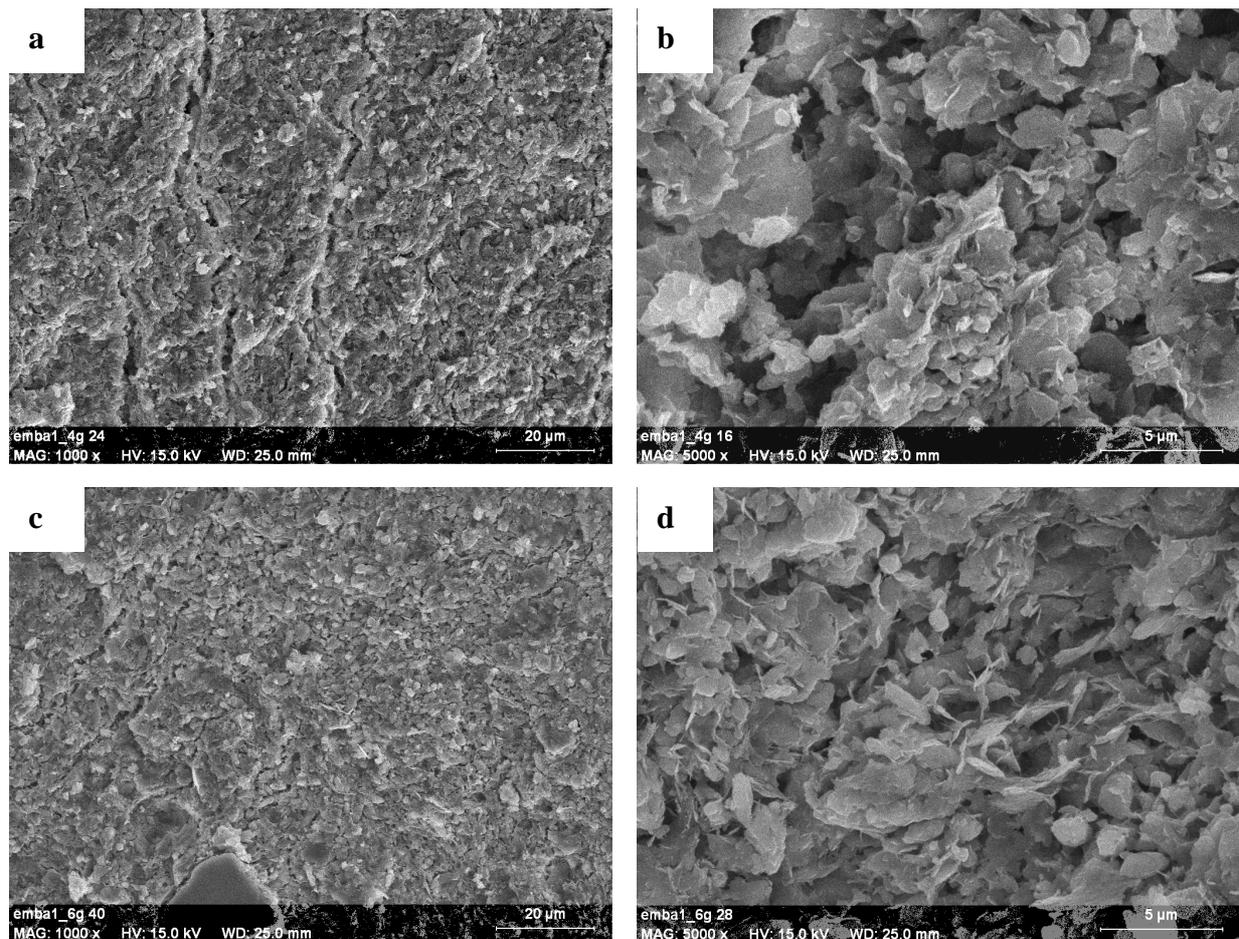


Figure 5.2.28 : Echantillons de EMBA-1 : après 4 cycles de gonflement libre, a) vue globale et la microfissuration perpendiculaire au plan du litage, b) détail de la microstructure ; après 6 cycles de gonflement libre c) vue globale de la microfissuration perpendiculaire au plan du litage, d) détail de la microstructure

L'échantillon EMBA-01 naturel qui contient relativement moins de carbonate (44 %) que EMBA-0 et EMBA-1 présente le gonflement le plus fort (10%) parmi les échantillons naturels. Ceci est certainement dû à sa microstructure relativement lâche. En effet, les carbonates ne semblent pas créer un réseau continu, mais se présentent sous forme d'amas. L'observation au MEB montre qu'une partie de la calcite est d'origine détritique et est concentrée dans des bioclasts (Figure 5.2.25). L'existence dans ce matériau de ces fragments de fossiles et de nids de pyrite introduit des discontinuités qui facilitent l'accès de l'eau, permettant ainsi aux argiles de s'hydrater et donc de gonfler.

Dans le cas de EMBA-1 et EMBA-0 naturels, les argiles sont pincées ou emprisonnées dans le réseau créé par les grains de calcite et ne peuvent donc pas exprimer leurs propriétés de gonflement. Le gonflement macroscopique reste donc très limité. Ceci est conforté par le comportement des mêmes échantillons dans l'état remanié pour lesquels une partie des liens entre les carbonates est détruite. Le gonflement enregistré est très important pour une composition minéralogique similaire. Dans le cas de ces sols remaniés, on observe un regroupement des argiles leur permettant ainsi d'exprimer pleinement leurs propriétés de gonflement.

5.2.4.1.c Conclusion –Evolution de la microstructure des sols au cours du gonflement, appréciée par l’observation au MEB

Les observations en microscopie électronique à balayage ont permis d’obtenir des informations intéressantes pour aider à expliquer le phénomène de gonflement. Le gonflement se produit par l’ouverture de microfissures successives, qui augmentent à chaque nouveau cycle d’imbibition et de séchage. Ainsi, pour les sols les plus consolidés et carbonatés, comme les Marnes bleues d’Argenteuil, la texture a une importance prépondérante. La teneur en carbonate ne peut pas se corrélérer avec le gonflement, dont l’importance dépend de la texture du sol.

Les observations au MEB montrent que les modifications de textures sont moins importantes pour les Marnes bleues d’Argenteuil. En effet, un seul cycle de gonflement faible n’a pas provoqué de perturbations significatives sur la microstructure du sol. Par contre, les Argiles vertes de Romainville montrent une évolution de texture très marquée au cours de gonflement. Les sols naturels possédant à l’état naturel une texture compacte où l’architecture en agrégats n’apparaît pas, évoluent au cours du gonflement en une texture en agrégats de plus en plus petits délimité par des pores bidimensionnels qui augmentent pendant le gonflement et à chaque cycle de gonflement. Ainsi, au cours des cycles successifs de gonflement, les agrégats de grande taille se divisent en agrégats secondaires plus petits faisant apparaître différents niveaux d’agrégation et de porosité. Cette observation corrobore les observations faite par Parcevaux (1980).

5.2.4.2 Etude porosimétrique

Des essais porosimétriques ont été effectués pour chacun des types de sol étudiés sur échantillons intacts (et/ou remaniés) et après un cycle de gonflement. A ces essais s’ajoutent des analyses porosimétriques d’échantillons d’EAVR-0 et d’EMBA soumis à des sollicitations hydriques cycliques (imbibition totale-séchage complet) et à des paliers de succion croissants.

Alors que l’observation au MEB présentée dans le paragraphe précédant permet de cerner qualitativement la texture des sols étudiés, les courbes porosimétriques analysées dans ce paragraphe conduisent à une étude quantitative du milieu poreux.

Dans cette étude, le porosimètre au mercure utilisé permet d’apprécier des volumes poreux (totaux, piégés et libres) accessibles par des rayons compris entre 3 nm et 180 μm . Ces volumes sont mesurés en mm^3 de vide par gramme de sol sec ($\text{mm}^3.\text{g}^{-1}$).

Dans ce paragraphe nous comparons des volumes poreux à des teneurs en eau. Pour un échantillon saturé, la teneur en eau exprimée en $\text{mm}^3.\text{g}^{-1}$ de sol correspond au volume poreux total en faisant l’approximation que le poids volumique de l’eau est de 1 g.cm^{-3} et en supposant que tous les pores accessibles à l’eau le sont au mercure. Bien souvent le volume poreux que nous mesurons ne sera que partiel car la porosité inférieure à 3 nm et supérieure à 180 μm ne sera pas prise en compte. Nous comparerons cependant le volume poreux occupé par le mercure à la teneur en eau correspondante. Nous utiliserons donc, dans ce paragraphe, l’unité $\text{mm}^3.\text{g}^{-1}$ à la fois pour les volumes poreux et les teneurs en eau, lorsque nous serons amenés à les comparer.

La porosité, n , se définit comme le rapport entre le volume des pores (V_v) et le volume total de l'échantillon (V)

$$V = V_v + V_s \quad n = \frac{V_v}{V_v + V_s}$$

V_s , est le volume occupé par le squelette solide

Soit V_T le volume poreux total par gramme de sol

$$V_T = \frac{V_v}{W_s} = n \times \frac{1}{\gamma_d}$$

γ_d , poids volumique du sol sec

W_s poids de l'échantillon (mesuré par pesée),

V est mesuré au volumètre au mercure, et V_s est calculé à partir de la relation :

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s},$$

γ_s poids volumique des grains

Nous connaissons ainsi V et V_s , ce qui permet de déterminer :

$$V_v, n = \frac{V_v}{V}$$

$$\text{donc } V_T = \frac{V_v}{W_s}.$$

Les résultats des essais porosimétriques sont présentés et analysés par type de sol. Afin de faciliter l'interprétation, en plus des courbes porosimétriques cumulées et dérivées, les principaux paramètres déductibles de l'essai porosimétrique sont présentés, à savoir :

- la teneur en eau de l'échantillon ;
- le volume poreux V_t accessible par des rayons de pores compris entre 3 nm et 180 μm ;
- le volume poreux piégé V_p au cours du retrait entre 3 nm et 180 μm . Ceci correspond pour une grande part à la porosité inter-agrégats (Vayssade, 1978 ; Delage, 1979 ; Parcevaux 1980) ;
- le volume poreux libre $V_L = V_t - V_p$ est composé en majorité de la porosité des pores les plus fins (intra-agrégats) et une partie de la porosité inter-agrégats ;
- le volume microporeux V_m défini par une coupure à 0,04 μm , caractérisant la porosité la plus fine. Cette coupure a été choisie arbitrairement au vu des courbes porosimétriques par sa position intermédiaire entre les deux familles de pores ;
- le volume poreux total V_T tel que défini précédemment, dont le but est de faire une comparaison avec le volume accessible par le mercure.

Dans ce paragraphe nous utiliserons de façon arbitraire le terme microporosité pour les rayons d'accès de pores inférieurs à 0,04 μm et macroporosité pour les rayons d'accès supérieurs.

5.2.4.2.a Argile verte de Romainville

Les courbes obtenues pour les échantillons d'Argile vertes de Romainville ainsi que les principaux paramètres déduits de ces courbes sont présentés sur les Figure 5.2.29 à Figure 5.2.33 et sur le Tableau 5.2.1.

- EAVR-0

Nous avons représenté sur un même diagramme en Figure 5.2.29 les courbes porosimétriques cumulées et dérivées des échantillons lyophilisés de EAVR-0 à l'état naturel (à teneur en eau différentes), après gonflement, après séchage à l'étuve, à l'état remanié (passage par la limite de liquidité et séchage jusqu'à une teneur en eau proche de la teneur en eau naturelle) et à l'état remanié gonflé. On constate que le volume poreux total V_t (volume poreux accessible par des rayons compris entre 3 nm et 180 μm), augmente avec la teneur en eau ou au cours du gonflement pour les 2 états (naturel et remanié) avec un taux de gonflement supérieur en volume pour le matériau remanié (AVR intact : 67 %, AVR remanié : 118 %), ce qui est en bon accord avec les résultats oedométriques. Le séchage se traduit par une diminution du volume poreux total de 48 %.

Pour les échantillons intacts, la porosité accessible par porosimétrie au mercure est de l'ordre de 81 % de la porosité totale calculée en supposant les échantillons saturés, avant gonflement et de 86 % après ; pour le sol remanié elle est de 78 % avant gonflement et passe à 91 % après gonflement. Cet écart relatif est plus important (20 %) pour les échantillons intact et remanié avant gonflement. Si l'on fait abstraction de quelques incertitudes de manipulation (retrait à la lyophilisation, mesure de la teneur en eau sur un échantillon voisin de celui analysé) dont l'importance reste faible par rapport à cet écart (< 5 %), une différence non négligeable est constatée entre V_t et w . Une des hypothèses avancées est que la part de porosité totale non mesurée par la porosimétrie au mercure n'est accessible que par des rayons d'accès inférieurs à 3 nm (limite inférieure mesurable par l'appareil), la part de porosité accessible par des accès supérieurs à 180 μm étant négligeable pour les sols étudiés.

Pour les échantillons avant gonflement, la distribution des rayons d'accès de pores est unimodale (Figure 5.2.29 b) et présente une queue de distribution vers les faibles rayons pour les 2 états (naturel et remanié). Ces courbes sont caractéristiques d'une structure matricielle argileuse (Audiguier et Delage 1987) dans laquelle l'architecture en agrégats n'apparaît pas.

La distribution des pores est centrée vers 0,07 μm , avec une plage comprise entre 0,04 et 0,1 μm , pour l'échantillon intact ($w = 25\%$) et vers 0,062 μm avec une étendue de 0,04 à 0,1 μm pour EAVR-remanié, ce qui est en accord avec l'observation microscopique. L'observation de ces sols au MEB montre une microstructure compacte avec quelques pores de forme allongée d'épaisseur inférieure à 0,3 μm situés entre les plaquettes argileuses.

Le séchage se traduit par une forte diminution de la valeur des rayons d'accès, caractérisée par un passage du rayon moyen de 0,07 μm à 0,017 μm . Cette évolution est attribuée à la forte proportion de particules argileuses (78 % < 2 μm) qui entraîne une rétraction globale de la matrice.

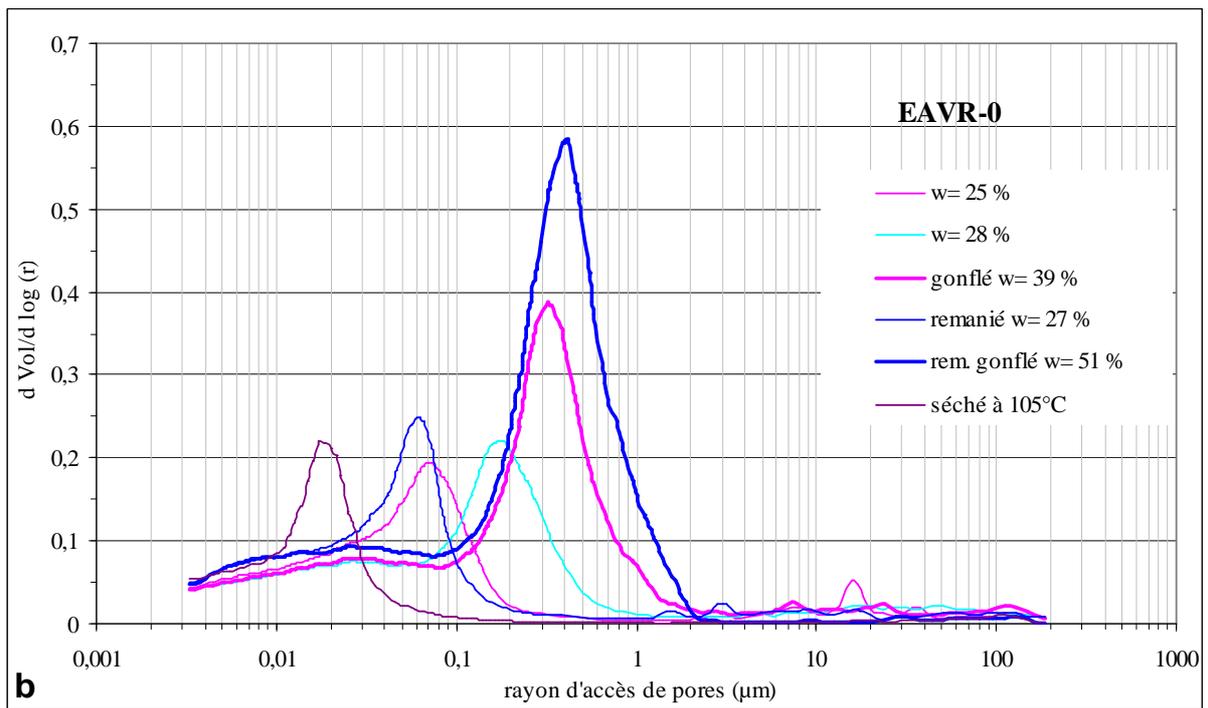
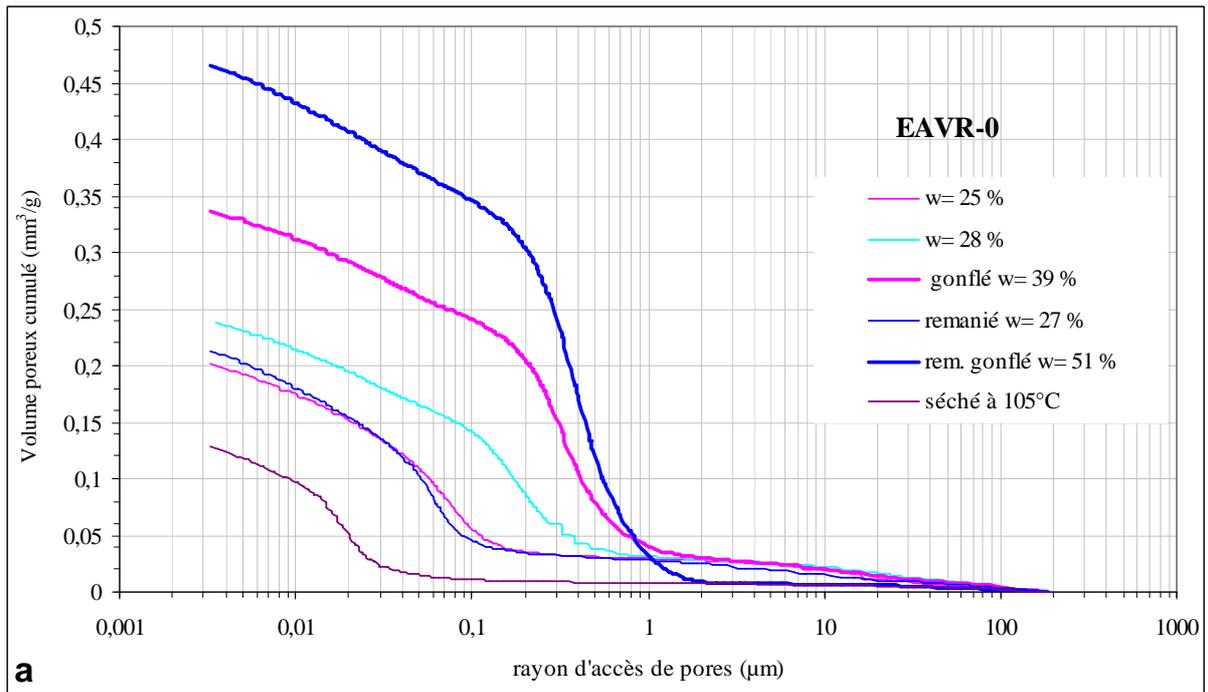


Figure 5.2.29 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-0) à l'état naturel, remanié, séché et après gonflement libre

Tableau 5.2.1 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons EAVR-0 intact et remanié

EAVR-0	Intact w = 25 %	Gonflé w = 39 %	Intact w = 28 %	Séché à 105°C	Remanié w = 27 %	Rem. Gonflé w = 44 %
w (mm ³ g ⁻¹)	249	393	280		273	513
Volume poreux, V _t (mm ³ g ⁻¹)	201	337	237	129	213	465
Porosité accessible au mercure (%)	33,6	45,7	37,5	24,2	34,8	53,8
Porosité totale calculée (%)	40,1	51,4	43,4	32,5	41,5	58,6
% de porosité accessible/ porosité totale (%)	81	86	85	75	78	91
V _T calculé (mm ³ g ⁻¹)	240	378	275		254	507
Rayons moyens (µm)	0,07	0,026/ 0,322	0,027/ 0,174	0,017	0,062	0,036/ 0,413
Volume piégé, V _P (mm ³ g ⁻¹)	112	258	163	65	114	355
Volume libre, V _L (mm ³ g ⁻¹)	89	79	75	64	114	110
Volume microporeux, V _m (mm ³ g ⁻¹)	79	69	67	112	96	87

Les échantillons gonflés présentent une distribution des rayons d'accès de pores ayant deux familles bien individualisées. Ainsi, l'échantillon intact gonflé présente une famille de pores (micropores) dont le rayon moyen est centré sur 0,026 µm, et une autre famille (macropores) vers 0,322 µm. L'échantillon remanié-gonflé présente également une distribution bimodale aux rayons moyens centrés vers 0,036 µm et 0,413 µm. On note aussi une distribution bimodale, moins nette, sur la courbe dérivée d'EAVR-0 intact dont la teneur en eau naturelle est élevée (w=28 %) : microporosité centrée sur 0,027 µm et la macroporosité vers 0,174 µm. Il apparaît donc que le gonflement conserve la distribution bimodale en modifiant cependant certains paramètres. Alors que le rayon moyen de la microporosité (centrée vers 0,027 µm) ne semble pas modifié significativement par le gonflement, le volume correspondant (représenté par la surface comprise entre la courbe et l'axe des abscisses) décroît légèrement lors du gonflement. En revanche, la macroporosité comprise entre les rayons 0,04 µm et 0,1 µm, bien classée à l'état naturel (w = 25 %), évolue au cours du gonflement. Son volume augmente et son rayon moyen se déplace vers les rayons d'accès croissants (le rayon moyen passe de 0,07 µm à environ 0,322 µm pour une étendue comprise entre 0,2 et 1 µm) (Figure 5.2.29 b). De même, la macroporosité de l'échantillon remanié (seuils compris entre 0,04 et 0,1 µm avant gonflement) voit son volume et son rayon d'accès moyen augmenter lors du gonflement (il passe de 0,062 µm environ à 0,413 µm), et sa répartition est alors comprise entre 0,2 et 1 µm. L'analyse au MEB met en évidence des fissures d'épaisseur micrométrique qui délimitent des agrégats, eux-mêmes subdivisés par d'autres fissures plus petites.

Enfin, l'analyse des courbes porosimétriques cumulées et des principaux paramètres accessibles par porosimétrie montre que (Figure 5.2.29 et Tableau 5.2.1) :

- la porosité piégée augmente considérablement au cours du gonflement pour les 2 états (intacts et remaniés). Elle passe de 112 à 258 mm³g⁻¹ pour l'échantillon intact, et de

114 à 355 mm³g⁻¹ pour l'échantillon remanié. Elle est donc multipliée respectivement par 2,3 et 3 au cours du gonflement.

- la porosité libre montre une légère décroissance. Elle passe de 89 à 79 mm³g⁻¹ pour l'échantillon intact, et de 114 à 110 mm³g⁻¹ pour l'échantillon remanié. Le volume microporeux montre également une légère décroissance.

Ceci montre que l'accroissement du volume poreux au cours du gonflement se traduit par un accroissement de porosité piégée (qui est essentiellement inter-agrégats) et donc que le gonflement affecte essentiellement l'arrangement de ces agrégats entre eux.

- o EAVR-1 et EAVR-C

Sur la Figure 5.2.30 a et b sont représentées respectivement les courbes porosimétriques cumulées et dérivées des échantillons EAVR-1 et EAVR-C lyophilisés : dans leur état naturel, après gonflement et séchés à l'étuve. Les deux sols donnent une distribution porale assez proche.

On constate que le volume poreux totale V_t mesuré par porosimétrie au mercure augmente au cours du gonflement pour les deux sols avec un taux de gonflement supérieur en volume pour EAVR-C (EAVR-1 intact : 71 %, EAVR -C intact : 81 %). Le séchage se traduit par une diminution du volume poreux total de 48 % pour EAVR-1 et de 38 % pour EAVR-C.

Le volume poreux total des échantillons naturels lyophilisés est respectivement de 208 mm³g⁻¹ et 194 mm³g⁻¹ pour EAVR-1 et EAVR-C, après gonflement il passe respectivement à 357 mm³g⁻¹ et 352 mm³g⁻¹. La porosité accessible au mercure des échantillons EAVR-1 et EAVR-C gonflés atteint respectivement 82 % et 85 % de la porosité totale calculée en supposant les échantillons saturés. Il existe donc une porosité intraparticulaire non mesurable par le dispositif expérimental dont les rayons d'accès sont inférieurs à 3 μm qui est soulignée par la présence d'une queue de distribution vers les faibles rayons commune aux 3 états d'hydratation.

L'analyse des courbes dérivées, montre que les échantillons EAVR-1 et EAVR-C à l'état naturel présentent une courbe porosimétrique nettement bimodale. Deux classes de pores sont mises en évidence, une première classe de pores de rayons d'accès inférieurs à 0,04 μm (micropores), centrée sur un rayon moyen de 0,014 μm pour EAVR-1 et de 0,011 μm pour EAVR-C, et une deuxième classe de pores plus gros dont les rayons d'accès sont supérieurs à 0,04 μm (macropores), centrée sur un rayon moyen de 0,08 μm pour EAVR-1 et de 0,067 μm pour EAVR-C.

L'observation au MEB montre en plus des pores situés entre les amas argileux, dus à la fissuration, un réseau de pores bidimensionnels, amorçant des délimitations d'agrégats, d'épaisseur inférieure à 1 μm.

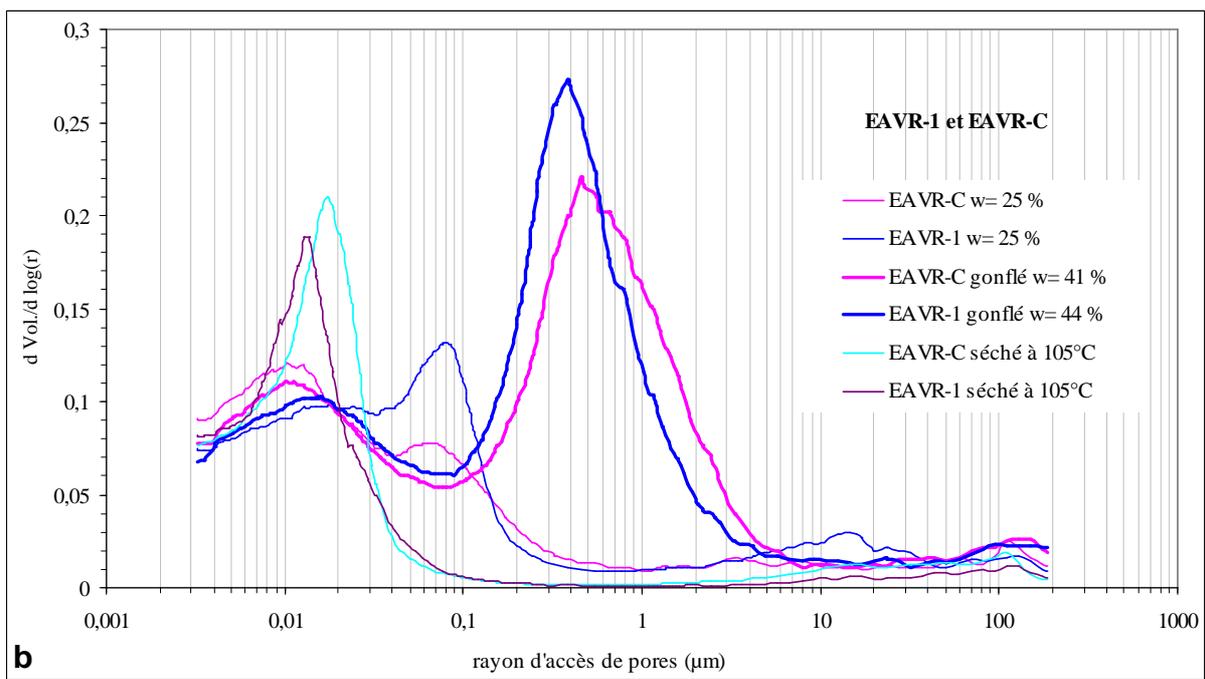
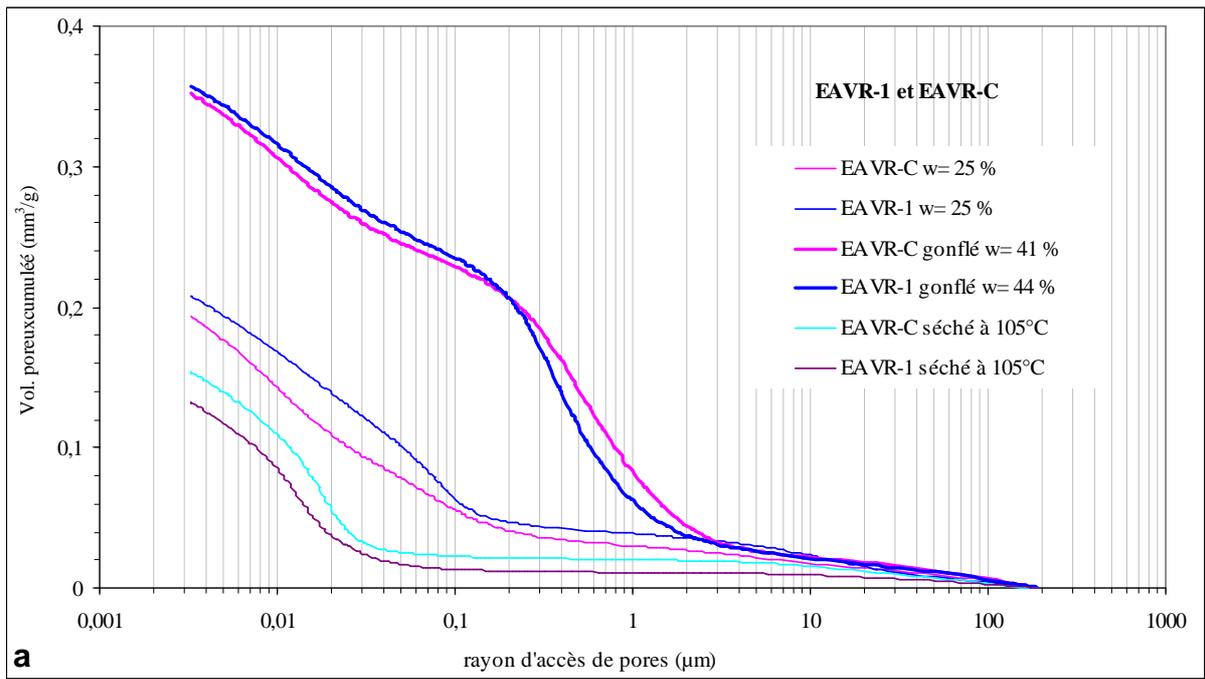


Figure 5.2.30 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-1 et EAVR-C) à l'état naturel, séché et après gonflement libre

Tableau 5.2.2 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons EAVR-1 et EAVR-C

	EAVR-1 intact	EAVR-1 gonflé	EAVR-1 séché	EAVR-C intact	EAVR-C gonflé	EAVR-C séché
w (mm ³ g ⁻¹)	253	439		249	414	
Volume poreux, V _t (mm ³ g ⁻¹)	208	357	132	194	352	154
Porosité accessible au mercure (%)	33,3	45,9	24,5	31,9	46,0	27,5
Porosité totale calculée (%)	42,5	53,9	33,8	41,1	53,3	36,1
% de porosité accessible/ porosité totale (%)	82,1	81,8		77,8	85,0	
V _T calculé (mm ³ g ⁻¹)	265	419	183	250	407	202
Rayons moyens (μm)	0,014/ 0,08	0,016/ 0,38	0,014	0,01/ 0,067	0,011/ 0,456	0,017
Volume piégé, V _p (mm ³ g ⁻¹)	124	271	71	110	271	83
Volume libre, V _l (mm ³ g ⁻¹)	84	86	62	84	81	71
Volume microporeux, V _m (mm ³ g ⁻¹)	96	88	114	110	102	127

Au séchage, on note une diminution de la valeur des rayons d'accès, caractérisée par la disparition de la macroporosité au profit de la microporosité avec passage du rayon moyen de 0,08 à 0,01 μm pour EAVR-1 et de 0,067 à 0,017 μm pour EAVR-C, ainsi la porosité attribuée au volume macroporosité est fortement diminuée lorsque celle de la microporosité augmente. Cette évolution est la conséquence d'une forte proportion de particules argileuses (80 % < 2 μm) dont l'arrangement est modifié par le départ de l'eau adsorbée.

Le gonflement conserve la distribution bimodale en modifiant certains paramètres : ainsi, le rayon moyen de la microporosité (centrée sur 0,014 pour EAVR-1 et sur 0,010 pour EAVR-C) ne semble pas modifié significativement par le gonflement. Par contre le rayon moyen de la macroporosité croît lors du gonflement, passant d'environ 0,08 μm à 0,38 μm (pour EAVR-1) et d'environ 0,067 à 0,456 μm pour EAVR-C. Cette augmentation est accompagnée par une forte croissance du volume poreux correspondant. Enfin, on passe d'une répartition allant de 0,04 μm à 0,15 μm avant gonflement à une répartition allant de 0,15 à 5 μm pour les deux échantillons.

Nous remarquons au vu des courbes porosimétriques cumulées et des principaux paramètres accessibles par porosimétrie (Figure 5.2.30 et Tableau 5.2.2) que :

- la porosité piégée augmente considérablement au cours du gonflement pour les deux sols. Elle passe de 60 % à 76 % pour l'échantillon EAVR-1, et de 57 % à 77 % pour l'échantillon EAVR-C ;
- la porosité libre subit très peu de changement. Le volume microporeux montre une légère décroissance. Il passe de 96 à 88 mm³g⁻¹ pour l'échantillon EAVR-1, et de 110 à 102 mm³g⁻¹ pour l'échantillon EAVR-C.

Comme dans le cas EAVR-0, l'accroissement du volume poreux dû au gonflement est principalement un accroissement de porosité piégée qui est en grande partie inter-agrégats.

- WAVR-0 et WAVR-1

Sur la Figure 5.2.31 et la Figure 5.2.32 sont représentées les courbes porosimétriques cumulées et dérivées, respectivement des échantillons WAVR-0 et WAVR-1 lyophilisés, dans leur état naturel, remaniés, après gonflement et séchés à l'étuve. Le Tableau 5.2.3 et le Tableau 5.2.4 donnent les caractéristiques des courbes porosimétriques de ces sols.

On constate que pour les deux sols, le volume poreux total V_t , augmente au cours du gonflement pour les deux états (naturel et remanié) avec un taux de gonflement supérieur en volume pour le matériau remanié, ce qui est en bon accord avec les résultats oedométriques. Le séchage se traduit par une diminution de volume poreux total de 30 %.

Les courbes porosimétriques des échantillons intacts lyophilisés, donnent un volume poreux total de $275 \text{ mm}^3 \text{ g}^{-1}$ et $276 \text{ mm}^3 \text{ g}^{-1}$ respectivement pour WAVR-0 et WAVR-1. Bien que le phénomène soit moins net que pour les échantillons de l'Est EAVR-1 et EAVR-C, les courbes sont aussi bimodales. Deux classes de pores sont mises en évidence, une première classe de pores (micropores, rayons d'accès $< 0,04 \mu\text{m}$) mal classés, et une deuxième classe de pores (macropores, rayon d'accès $> 0,04 \mu\text{m}$) centré sur un rayon moyen de $0,063 \mu\text{m}$ pour WAVR-0 et sur $0,081 \mu\text{m}$ pour WAVR-1). Cette famille de pores est aussi mal classée, avec une répartition allant de $0,04 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$. Les échantillons remaniés montrent une allure similaire mais sont relativement mieux classés. Ainsi WAVR-0 remanié montre une classe de pores centré sur $0,074 \mu\text{m}$ avec un petit infléchissement de la courbe entre $0,04 \mu\text{m}$ et 3 nm , alors que WAVR-1 remanié présente une classe de pores centré sur $0,077 \mu\text{m}$ et une autre moins importante vers $0,009 \mu\text{m}$.

Au séchage, on note une diminution de la valeur des rayons d'accès, caractérisée par la disparition de la famille de macroporosité et par le passage du rayon moyen de $0,063 \mu\text{m}$ à $0,036 \mu\text{m}$ pour WAVR-0 et de $0,081 \mu\text{m}$ à $0,034 \mu\text{m}$ pour WAVR-1.

Les courbes porosimétriques des échantillons intacts gonflés montrent également une distribution bimodale avec quelques modifications. Ainsi le rayon moyen de la microporosité (centrée approximativement sur $0,009 \mu\text{m}$) ne semble pas significativement modifié par le gonflement. En revanche, le rayon moyen de la macroporosité croît lors du gonflement, passant d'environ $0,063 \mu\text{m}$ à environ $0,111 \mu\text{m}$ pour WAVR-0 et de $0,077 \mu\text{m}$ à $0,17 \mu\text{m}$ pour WAVR-1.

Tableau 5.2.3 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons WAVR-0

WAVR-0	Intact	Intact gonflé	remanié	Remanié gonflé	Séché à 105°C
w (mm ³ g ⁻¹)	298	375	281	415	
Volume poreux, V _i (mm ³ g ⁻¹)	275	340	252	396	193
Porosité accessible au mercure (%)	40,7	45,6	38,8	49,9	32,7
Porosité totale calculée (%)	46,4	51,4	44,2	54,3	38,4
% de porosité accessible/ porosité totale (%)	92,4	90,7	89,8	95,4	
V _T calculé (mm ³ g ⁻¹)	314	383	287	431	226
Rayons moyens (µm)	0,063	0,111	0,074	0,036/ 0,19	0,036
Volume piégé, V _P (mm ³ g ⁻¹)	114	148	97	284	
Volume libre, V _L (mm ³ g ⁻¹)	161	192	155	112	193
Volume microporeux, V _m (mm ³ g ⁻¹)	121	114	100	93	152

Tableau 5.2.4 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons WAVR-1

WAVR-1	Intact	Intact gonflé	remanié	Remanié gonflé	Séché à 105°C
w (mm ³ g ⁻¹)	311	352	315	489	0
Volume poreux, V _i (mm ³ g ⁻¹)	276	327	283	470	191
Porosité accessible au mercure (%)	40,9	45,1	41,7	54,3	32,6
Porosité totale calculée (%)	46,5	50,3	46,7	58,3	38,5
% de porosité accessible/ porosité totale (%)	88,7	93,0	89,8	96,2	
V _T calculé (mm ³ g ⁻¹)	314	365	317	506	226
Rayons moyens (µm)	0,081	0,11	0,009/ 0,077 / 0,65	0,009/ 0,17 / 0,38	0,0376
Volume piégé, V _P (mm ³ g ⁻¹)	110	132	131	257	
Volume libre, V _L (mm ³ g ⁻¹)	166	195	152	213	191
Volume microporeux, V _m (mm ³ g ⁻¹)	107	108	107	101	144

Les courbes porosimétriques des échantillons remaniés gonflés montrent également une distribution bimodale. Dans le cas de WAVR-0, on observe une première famille de microporosité centrée sur 0,036 µm bien marquée et la famille de macroporosité centrée sur 0,19 µm s'étendant entre 0,04 et 2 µm. WAVR-1 remanié gonflé conserve également la distribution bimodale de l'état naturel avec quelques modifications. Alors que le rayon moyen de la microporosité centrée vers 0,009 µm n'est pas significativement modifié par le gonflement, celui de la macroporosité croît et la famille est mal classée, passant d'environ **0,077 / 0,65** µm à environ **0,17 / 0,38** µm. Le volume poreux de la macroporosité augmente nettement et sa répartition de 0,04 à 0,2 µm avant gonflement passe à une répartition allant de 0,04 à 2 µm après gonflement.

Le gonflement provoque ainsi l'accroissement du volume total des pores dont les rayons d'accès correspondent aux macropores (confirmé par l'observation au MEB). Par ailleurs, le volume total de la porosité accessible par des faibles rayons (volume microporeux, inférieurs à 0,04 µm) décroît. La porosité piégée augmente et la porosité libre décroît au cours du gonflement pour les deux sols, ce phénomène est plus fort pour les échantillons remaniés.

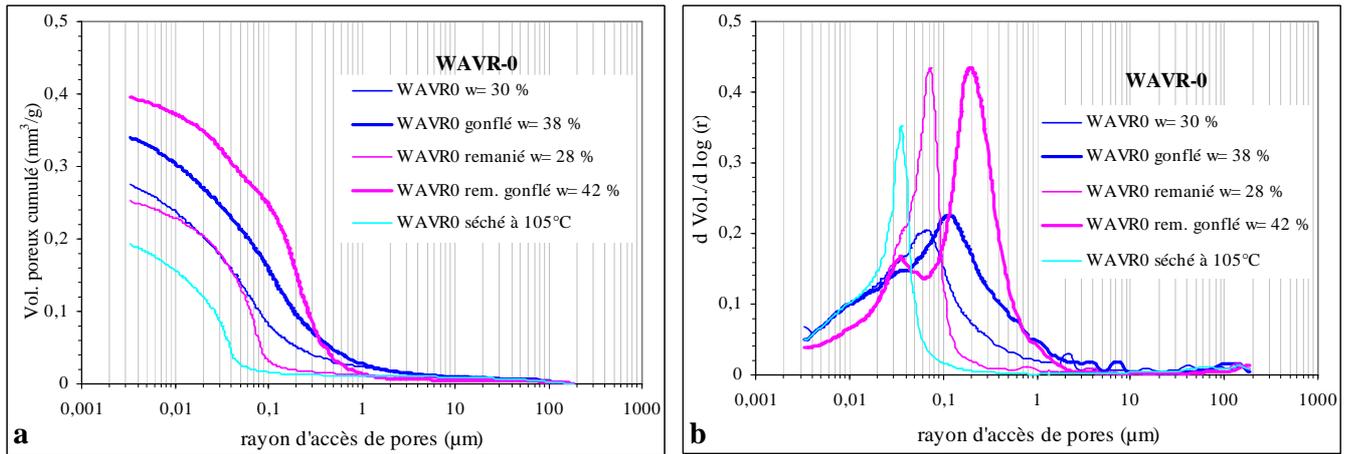


Figure 5.2.31 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (WAVR-0) à l'état naturel, séché et après gonflement libre

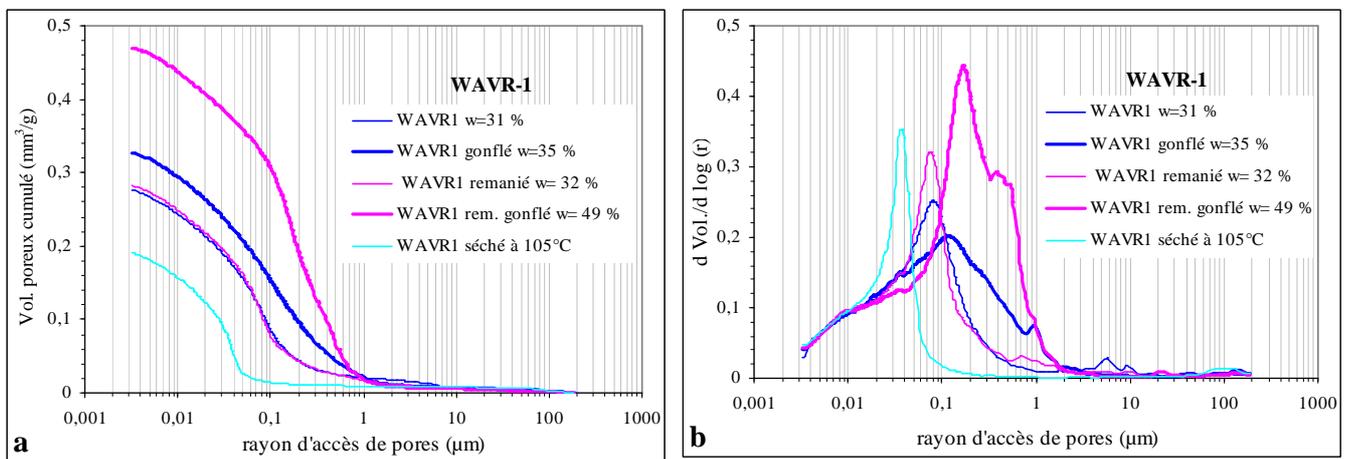


Figure 5.2.32 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores de l'Argile verte de Romainville (WAVR-1) à l'état naturel, séché et après gonflement libre

5.2.4.2.b *Marnes bleues d'Argenteuil*

La Figure 5.2.33 présente les courbes porosimétriques de MBA après lyophilisation : à l'état naturel, après gonflement, après séchage à 105 °C, à l'état remanié et à l'état remanié gonflé. On constate que la Marne bleue d'Argenteuil à l'état naturel présente une courbe porosimétrique unimodale et une queue de distribution vers les faibles rayons, dénotant une microporosité non accessible par la porosimétrie au mercure. Le volume poreux est compris entre 202 et 354 mm³g⁻¹ dont environ 40 % de porosité piégée (Tableau 5.2.5). La porosité accessible au mercure est comprise entre 33,8 et 46,6 %. Le rapport de la porosité accessible à la porosité totale calculé en supposant les échantillons saturés, est compris entre 84,8 et 95,8 %. La porosité non mesurable par le dispositif expérimental dont les rayons d'accès sont inférieurs à 3 nm est donc inférieure à 15 %. Les distributions obtenues sur les échantillons EMBA-1, EMBA-01, EMBA-0 et WMBA-0 définissent une famille de rayons d'accès de pores étendue entre 0,04 et 0,1 µm et centrée respectivement autour des valeurs : 0,059 µm, 0,062 µm, 0,060 µm, et 0,040 µm. Ces accès ont une taille plus faible que celle des pores observés au MEB, ce qui peut être attribué au fait que les pores sont accessibles par les vides ménagés dans les argiles.

La diminution du volume poreux total au séchage est assez faible, de l'ordre de 20 %, ce qui est caractéristique d'une structure en squelette constitué ici par des grains de calcite (Audiguier et Delage, 1987). Le séchage affecte également très peu la taille des pores. Le rayon moyen d'accès diminue légèrement pour passer de 0,059 µm à 0,057 µm pour EMBA-1, de 0,04 µm à 0,038 µm pour WMBA-0, et est inchangé pour EMBA-0. Cette faible rétraction est l'indice d'une organisation jointive des grains de calcite qui forment une structure semi-rigide qui se modifie peu lors du départ de l'eau. Pour EMBA-01 la diminution du rayon d'accès au séchage est un peu plus élevée, le rayon d'accès diminue de 0,062 µm à 0,054 µm, ce qui peut correspondre à une rétraction des argiles qui emballent les amas de grains de calcite (cf observations au MEB).

L'analyse des courbes de MBA intact, après gonflement met en évidence une augmentation du volume poreux de 9 à 32 % au cours du gonflement. L'augmentation du volume poreux le plus grand au cours du gonflement étant enregistré pour EMBA-01 (32 %), ce qui est en accord avec les résultats oedométriques et l'observation au MEB. Globalement, le gonflement conserve la distribution unimodale de l'état naturel en modifiant légèrement les rayons moyens d'accès de pores. Ainsi, le rayon moyen croît lors du gonflement, passant d'environ 0,06 µm à environ 0,075 µm pour EMBA-1 et EMBA-0, d'environ 0,06 µm à environ 0,086 µm pour EMBA-01. Pour WMBA-0 on constate une légère décroissance du rayon moyen (de 0,04 µm à environ 0,036 µm) qui peut être liée à un effondrement et/ou un comblement localisé des pores existants par le gonflement de particules argileuses qui étaient auparavant pincées entre des grains de calcite. Les courbes de distribution des échantillons EMBA-01 et WMBA-0 gonflés montrent l'apparition d'une deuxième famille, mal classée et moins nette, de pores compris respectivement entre 1 et 3 µm, et 0,4 et 1,1 µm qui peut être lié à la fissuration et aux nids de pyrite observés au MEB.

Le Tableau 5.2.5 résume la répartition du volume poreux de chaque famille de porosité dont les bornes correspondant aux rayons de seuil limitent des familles dominantes observées sur les courbes porosimétriques avant gonflement.

On remarque que la porosité accessible par des rayons d'entrée < 0,1 µm décroît au cours du gonflement. En revanche, la porosité accessible par des rayons d'entrée > 0,1 µm a augmenté

Echantillons	w ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)	Volume poreux, V_t ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)	Porosité accessible au mercure (%)	Porosité totale calculée (%)	% de porosité accessible/ porosité totale (%)	V_T calculé ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)	Rayons moyens (μm)	Volume piégé, V_P ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)	Volume libre, V_L ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)	Volume microporeux, V_m ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)
EMBA1										
naturel	234	202	33,8	39,1	86,2	233	0,059	84	118	72
gonflé	249	239	37,1	43,7	96,1	282	0,074	117	122	69
séché	0	184	31,9	37,0		213	0,057			76
remanié	239	219	35,6	40,9	91,6	251	0,0738	87	132	72
rem. Gonflé	351	329	45,2	50,1	93,7	364	0,173	220	109	66
EMBA01										
naturel	270	229	36,8	42,6	84,8	245	0,0622	99	130	75
gonflé	365	303	43,1	49,1	83,0	345	0,0862/ (1-3 μm)	152	151	77
séché	0	197	33,2	39,9		237	0,0543			76
remanié	268	236	37,1	43,7	87,9	277	0,0601	96	140	76
rem. Gonflé	452	430	51,5	57,2	95,1	478	0,204	323	107	64
EMBA0										
naturel	370	354	46,6	51,5	95,8	392	0,06	141	213	120
gonflé	403	386	49,3	53,0	95,9	416	0,076	151	235	108
séché	0	286	41,4	46,7		323	0,06			120
remanié	352	343	46,1	50,4	97,5	375	0,066	125	218	107
rem. Gonflé	516	520	56,4	59,9	101	552	0,13	195	325	97
WMBA0										
naturel	279	243	38,3	42,8	87,2	273	0,04	104	139	131
gonflé	308	275	40,8	46,0	89,3	310	0,036	134	141	142
séché		197	33,4	38,4		227	0,0375			162
remanié	283	256	39,5	43,8	90,4	283	0,034/0,098	96	160	74
rem. Gonflé	368	361	47,9	51,9	98,2	392	0,036/0,189	213	148	71

Tableau 5.2.5 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons de Marnes bleues d'Argenteuil

considérablement (Tableau 5.2.6). Cette porosité est attribuée en grande partie à la fissuration au cours du gonflement. Le volume piégé augmente légèrement au cours de gonflement (Tableau 5.2.5).

Les échantillons de MBA remaniés enregistrent une forte augmentation de la porosité en taille et en volume au cours de gonflement (Tableau 5.2.5 et Tableau 5.2.6). Le volume poreux augmente de 40 à 82 % montrant ainsi un potentiel de gonflement supérieur aux sols intacts, ce qui est en bon accord avec les résultats oedométriques. Ici, encore le gonflement conserve la distribution porale de l'état initial avant gonflement mais modifie cependant certains paramètres : alors que les faibles rayons d'entrée ($< 0,04 \mu\text{m}$) ne sont pas modifiés, le rayon moyen de la famille dominante croît lors du gonflement, passant d'environ $0,057 \mu\text{m}$ à environ $0,173 \mu\text{m}$, de $0,06 \mu\text{m}$ à $0,204 \mu\text{m}$, de $0,066 \mu\text{m}$ à $0,13 \mu\text{m}$ et de $0,098 \mu\text{m}$ à $0,189 \mu\text{m}$ respectivement pour EMBA-1, EMBA-01, EMBA-0 et WMBA-0. La différence entre la taille des accès de pores mesurés au porosimètre et celle plus faible observée au MEB ainsi que la très forte porosité piégée (60 à 75 %) mesurée montrent que la majorité des pores sont de type vacuolaire, et accessibles par des étranglements.

Ces résultats confirment le fait que les carbonates présents en grande quantité dans MBA contribuent à l'édification d'un squelette semi-rigide qui s'oppose au gonflement, mais qui est néanmoins fragile puisque détruit par le remaniement.

Tableau 5.2.6 : Variation de volume des différentes familles de rayons d'accès de pore (Marnes bleues d'Argenteuil)

		Volume poreux (%)		
		0,003 - 0,04 μm	0,04 - 0,1 μm	> 0,1 μm
EMBA1	naturel	35,6	52,5	11,9
	gonflé	28,9	42,7	28,5
	remanié	32,9	54,8	12,3
	<i>rem. gonflé</i>	20,1	17,6	62,3
EMBA01	naturel	32,8	53,7	13,5
	gonflé	25,4	40,6	34,0
	remanié	32,2	56,8	11,0
	<i>rem. gonflé</i>	14,9	14,2	70,9
EMBA0	naturel	33,9	48,9	17,2
	gonflé	28,0	52,6	19,4
	remanié	31,2	57,4	11,4
	<i>rem. gonflé</i>	18,7	24,2	57,1
WMBA0	naturel	53,9	28,8	17,3
	gonflé	51,6	21,1	27,3
	remanié	28,9	45,7	25,4
	<i>rem. gonflé</i>	19,7	16,1	64,3

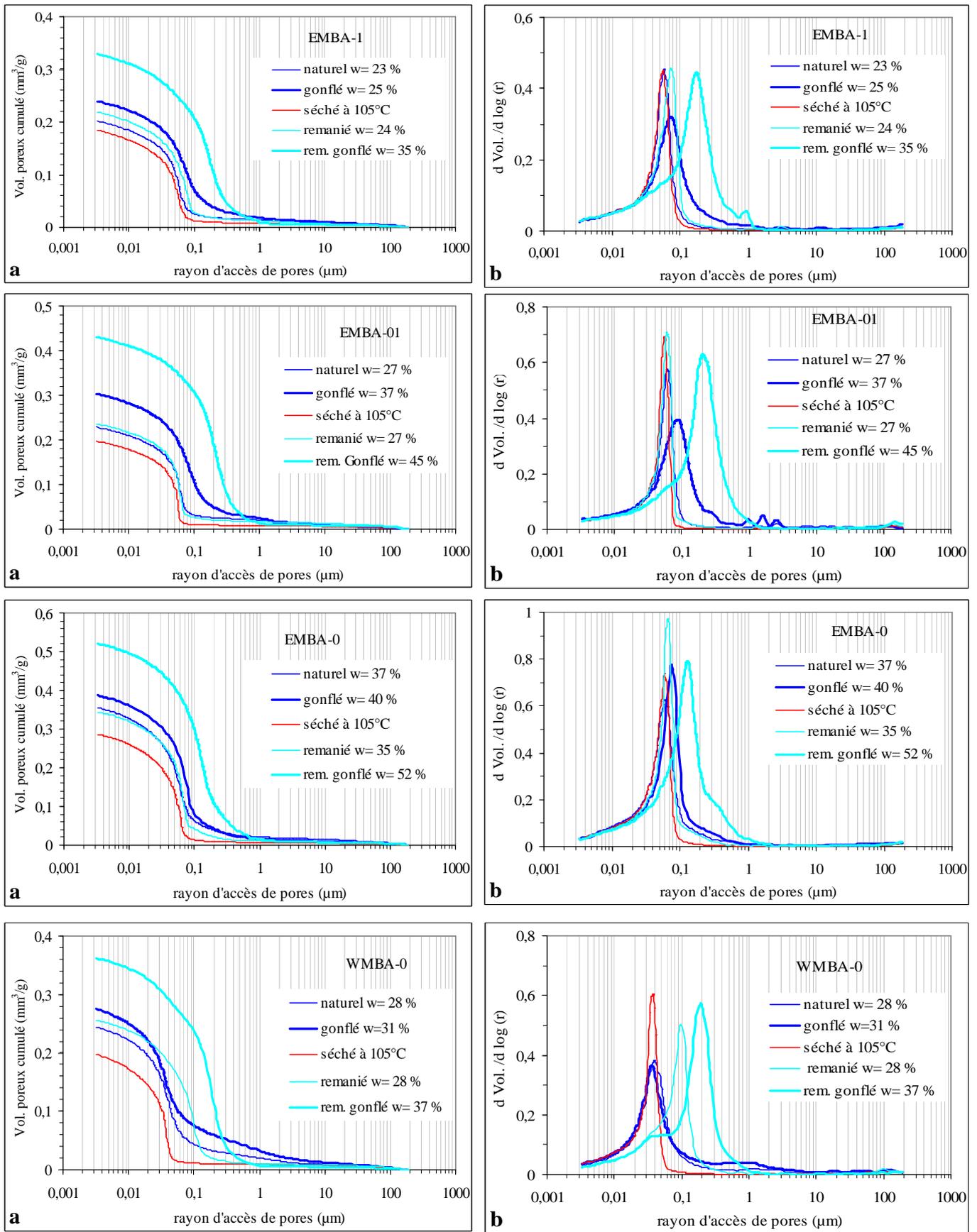


Figure 5.2.33 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons de pores des Marnes bleues d'Argenteuil lyophilisées (EMBA-1, EMBA-01, EMBA-0 et WMBA-0) à l'état naturel, remanié, séché et après gonflement libre

5.2.4.2.c Evolution de la structure interne des éprouvettes d'Argiles vertes de Romainville et de Marnes bleues d'Argenteuil au cours des cycles humectation-dessiccation

Afin d'apprécier l'influence de sollicitations hydriques cycliques sur la microstructure, des éprouvettes d'Argiles vertes de Romainville (EAVR-0, EAVR-C) et de Marnes bleues d'Argenteuil (EMBA-1 et EMBA-01) soumises à un nombre de cycles imbibition totale-retrait total croissants ont été aussi analysées au porosimètre au mercure et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus sur les échantillons naturels correspondants.

Les résultats des essais porosimétriques sont présentés sur la Figure 5.2.34 et la Figure 5.2.35. Sur la Figure 5.2.34 a et c sont représentées les courbes cumulées de distribution des rayons d'accès de pores de EAVR-0 à l'état initial et après 1, 3, 5, 9 et 11 cycles ; et celles de EAVR-C à l'état initial et après 1, 3 et 5 cycles. Les résultats montrent que le volume poreux accessible par la porosimétrie au mercure augmente au cours des cycles de gonflement (de 68 à plus 200 % pour EAVR-0 et de 62 à 80 % pour EAVR-C). Dans tous les échantillons de AVR, nous constatons que la porosité accessible par des pores de petite taille (rayon de seuil $< 0,04 \mu\text{m}$) et de grande taille (rayon de seuil $> 5\mu\text{m}$) n'est pas ou peu modifiée.

Les Figure 5.2.34 b et d présentent respectivement les courbes dérivées de distribution des accès de pores des différents cycles pour EAVR-0 et EAVR-C. La porosité comprise entre $0,04$ et $0,2 \mu\text{m}$, qui est très bien classée à l'état naturel, évolue au cours des cycles successifs. Son rayon modal se déplace d'abord vers les rayons d'accès croissants jusqu'au cinquième cycle, diminue ensuite légèrement et se stabilise pour les 2 derniers cycles. Ainsi le rayon modal de EAVR-0 se déplace progressivement de $0,07 \mu\text{m}$ à $0,32 \mu\text{m}$, $0,38 \mu\text{m}$, $0,67 \mu\text{m}$, $0,54 \mu\text{m}$ et $0,55 \mu\text{m}$; celui de EAVR-C se déplace de $0,086 \mu\text{m}$ à $0,55 \mu\text{m}$ puis se stabilise. On remarque qu'au-delà du cinquième cycle (3ème cycle pour EAVR-C), le gonflement favorise une homogénéisation du milieu poreux plus que l'accroissement du rayon moyen d'accès de pores. Les résultats montrent que la déformation ou l'évolution des pores se stabilise plus vite pour l'échantillon EAVR-C que l'échantillon EAVR-0. Ceci peut-être expliqué par le fait que EAVR-C a déjà été exposé à des cycles climatiques successifs de séchage-humidification.

A l'état naturel, l'Argile verte de Romainville EAVR-0 ne présente qu'une seule famille de pores vers les très faibles rayons ($0,07 \mu\text{m}$). A l'état naturel EAVR-C présente une courbe bimodale, une centrée vers $0,015 \mu\text{m}$ et une autre vers $0,09 \mu\text{m}$. La famille de microporosité n'est pas ou peu affectée par le gonflement. Le gonflement libre dû aux humidifications cycliques se traduit donc principalement par une augmentation de la porosité accessible par des pores dont le rayon de seuil est supérieur à $0,04 \mu\text{m}$ (macropores). Ceci montre que le gonflement libre dû aux humidifications cycliques se traduit plus particulièrement par une augmentation de la macroporosité (inter-agrégats), représentée en grande partie par la porosité piégée (Tableau 5.2.7).

Les distributions de pores obtenues par la porosimétrie au mercure pour les échantillons EMBA-1 et EMBA-01 ainsi que les principaux paramètres déduits de ces courbes sont présentés sur la Figure 5.2.35 et Tableau 5.2.7. On note que :

- le volume poreux et le rayon moyen d'accès des pores augmentent régulièrement au cours de gonflement ;

- le volume poreux est relativement plus important dans le cas de l'échantillon EMBA-01 ;
- le volume poreux accessible au porosimètre à mercure augmente de 18 à 45 % pour EMBA-1 et de 30 à 90 % pour EMBA-01 au cours des cycles de gonflement, entraînant ainsi une modification structurale plus importante ;
- dans le cas de EMBA-1, on note que le 9^{ème} cycle présente un volume poreux moins élevé que celui du 6^{ème} cycle. Ceci correspondrait à un effondrement du squelette lors de la réhumidification, par rupture des liaisons carbonatées qui sont fragilisées par les cycles successifs ;
- l'évolution du rayon d'accès de pores est plus importante pour l'échantillon EMBA-01, il passe de 0,062 μm à 0,086 μm , 0,245 μm et 0,270 μm , avec l'apparition d'une deuxième famille de pores d'accès de rayon moyen centré vers 0,053 μm . Le rayon moyen d'EMBA-1 se déplace progressivement de 0,06 μm à 0,074 μm , 0,111 μm et 0,126 μm ;
- pour les deux sols, nous constatons que la porosité accessible par les pores de petite taille (rayon de seuil < 0,04 μm) et de grande taille (rayon de seuil de pore > 5 μm) n'est pas ou peu modifiée. Le gonflement libre dû aux humidifications cycliques se traduit principalement par une augmentation de la porosité accessible par des pores dont le rayon de seuil est supérieur à 0,1 μm qui correspond à l'écartement des agrégats et à l'ouverture de microfissures, elle est en grande partie responsable de la porosité piégée (Tableau 5.2.7).

Au cours des cycles d'hydratation, pour les deux formations (Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d'Argenteuil), la microstructure du sol évolue, la porosité augmente en taille et en volume par ouverture progressive de la macroporosité (porosité inter-agrégat) et par ouverture de microfissures.

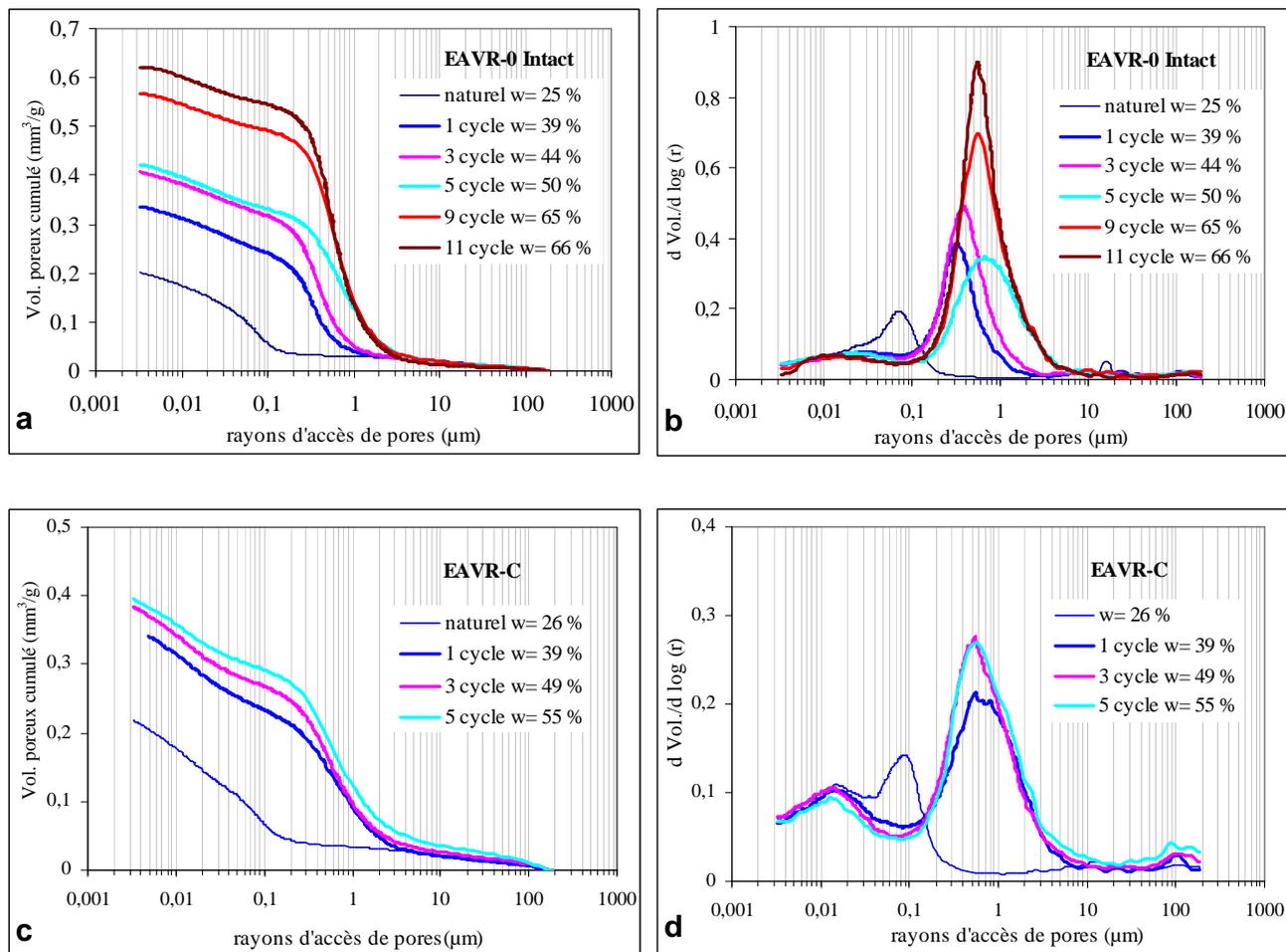


Figure 5.234 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons d'accès de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-0) pour les cycles 1, 3, 5, 9 et 11. Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des rayons d'accès de pores de l'Argile verte de Romainville (EAVR-C) pour les cycles 1, 3, 5

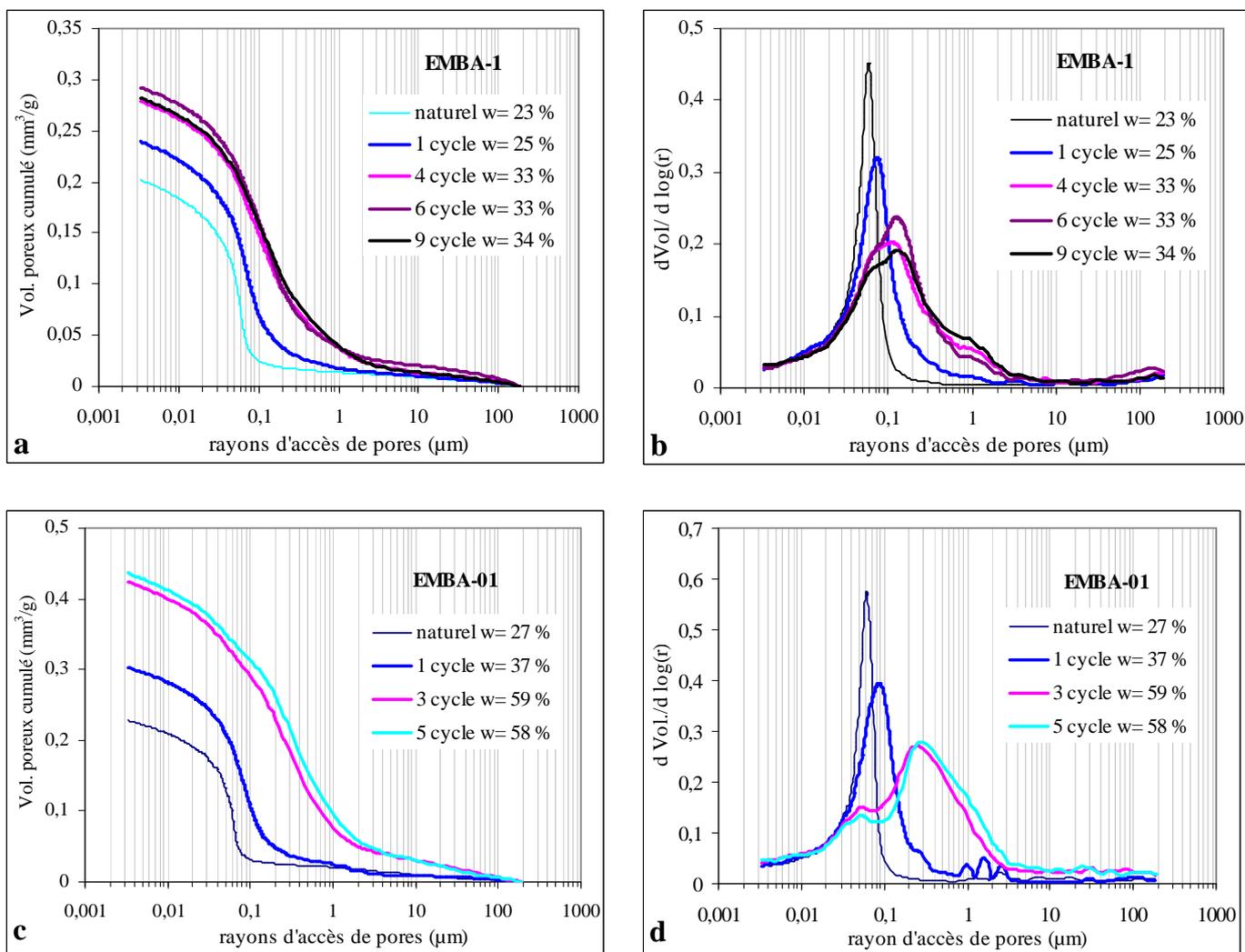


Figure 5.2.35 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des rayons d'accès de pores des Marne bleues d'Argenteuil (EMBA-1) pour les cycles 1, 4, 6, 9 et 11. Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des rayons d'accès de pores de EMBA-01 pour les cycles 1, 3, 5

Echantillons	w (mm ³ g ⁻¹)	Volume poreux, V_t (mm ³ g ⁻¹)	Porosité accessible au mercure (%)	Porosité totale calculée (%)	% de porosité accessible/porosité totale (%)	V_T calculé (mm ³ g ⁻¹)	Rayons moyens (µm)	Volume piégé, V_P (mm ³ g ⁻¹)	Volume libre, V_L (mm ³ g ⁻¹)	Volume microporeux, V_m (mm ³ g ⁻¹)
EAVR-0										
naturel	249	201	33,6	40,1	80,8	240	0,07	112	89	79
1 cycle	393	337	45,7	51,4	85,6	378	0,026/0,322	258	79	69
3 cycle	440	407	50,3	55,7	92,4	450	0,026/0,384	316	91	66
5 cycle	495	423	51,3	56,5	85,4	465	0,024/0,67	322	101	71
9 cycle	650	569	58,4	63,2	87,5	616	0,01/0,54	340	229	60
11 cycle	663	622	60,5	65,1	93,8	670	0,01/0,55	321	302	60
EAVR-C										
naturel	258	218	35,0	42,7	84,5	267	0,015/0,086	124	94	103
1 cycle	388	353	46,4	53,0	91,0	403	0,014/0,55-0,80	270	83	95
3 cycle	492	384	48,4	54,9	78,0	435	0,014/0,548	282	102	96
5 cycle	554	395	46,9	53,3	64,8	407	0,013/0,545	309	86	85
EMBA-1										
naturel	270	229	36,8	42,6	84,8	245	0,062	99	130	75
1 cycle	365	303	43,1	49,1	83,0	345	0,086/ (1 - 3 µm)	152	151	77
3 cycle	588	425	51,0	57,1	72,2	475	0,054/0,245	300	124	78
5 cycle	580	436	53,2	56,5	75,2	463	0,051/0,270	316	119	77
EMBA-01										
naturel	234	202	33,8	39,1	86,2	233	0,059	84	118	72
1 cycle	249	239	37,1	43,7	96,1	282	0,074	117	122	69
4 cycle	332	279	41,3	46,2	84,0	312	0,111	156	123	62
6 cycle	332	292	42,7	46,9	88,0	321	0,126	155	137	62
9 cycle	336	282	41,8	46,2	84,0	312	0,126	157	125	62

Tableau 5.2.7 : Caractéristiques des courbes porosimétriques des échantillons d'Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil soumis à des sollicitations hydriques cycliques

5.2.4.2.d Analyse des variations microstructurales en fonction de la succion imposée

L'influence de la succion sur la microstructure interne des sols a été aussi étudiée à l'aide des essais porosimétriques.

Les distributions porales présentées respectivement sur la Figure 5.2.36 et la Figure 5.2.37 correspondent à des échantillons intacts de EAVR-0 et de EMBA-1 soumis à des succions croissantes sous une contrainte extérieure totale nulle. Des succions supérieures à celle correspondant à l'état initial sont imposées en utilisant des solutions salines (voir chapitre 2). La succion totale initiale mesurée par la technique du papier filtre est de l'ordre de 750 kPa pour EAVR-0 et de 300 kPa pour EMBA-0. Les résultats obtenus nous permettent d'apprécier l'influence de la succion (ou de la dessiccation) sur l'organisation porale des sols étudiés.

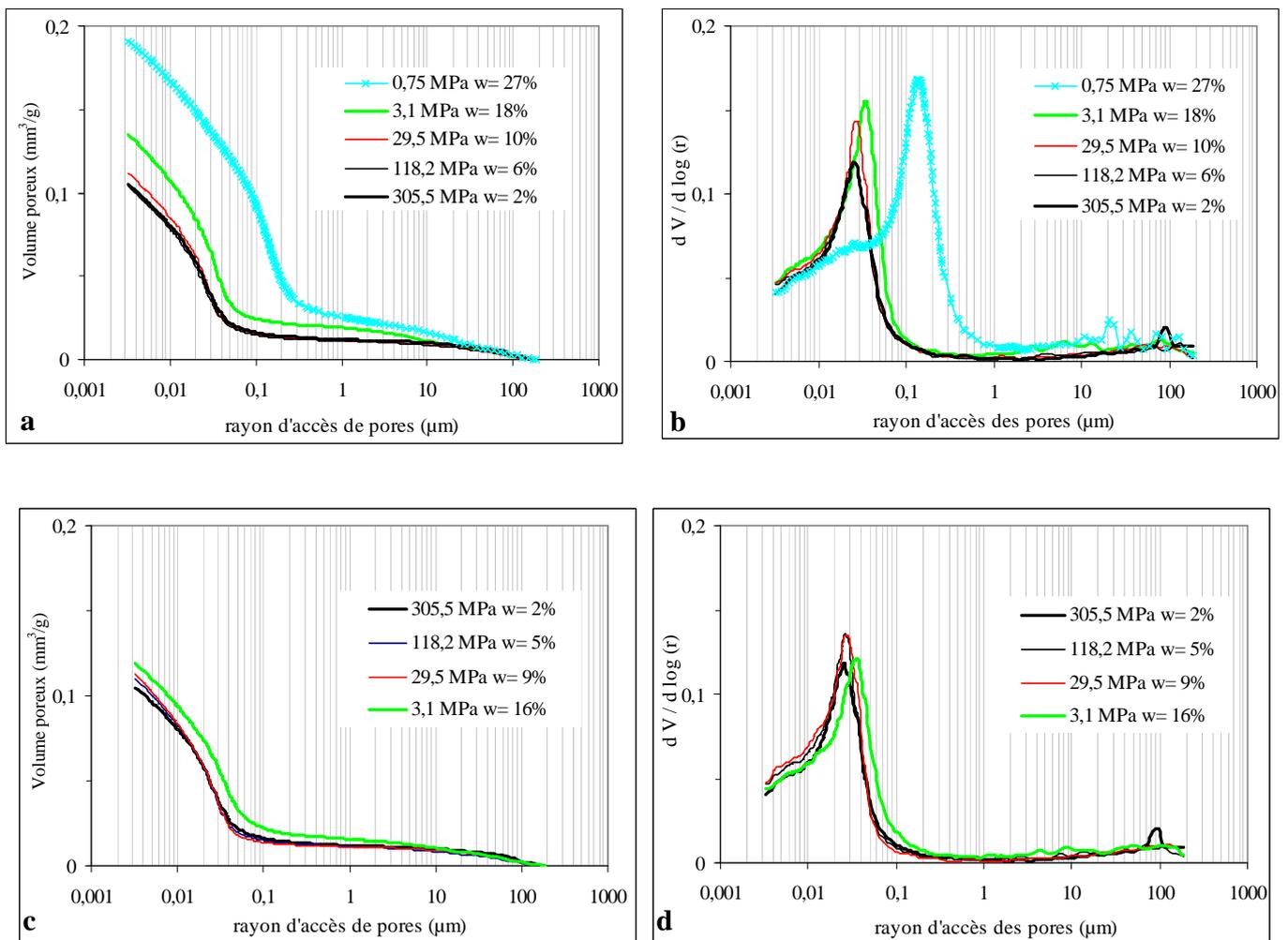


Figure 5.2.36 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des accès de pores de EAVR-0 au cours du drainage à différentes succions ; Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des accès de pores de EAVR-0 au cours de la réhumidification

L'analyse des résultats des essais porosimétriques nous conduit à faire les observations suivantes :

- pour les deux sols, nous remarquons que les courbes de distribution porale montrent une diminution du volume poreux et du rayon moyen d'accès de pores avec une augmentation de la succion (séchage). La distribution porale bimodale de EAVR-0 à l'état initial évolue vers une distribution unimodale lorsque le sol est soumis à une succion de 3,1 MPa et plus. Le volume poreux accessible par le mercure est diminué de 30 à 45 % et le rayon moyen d'accès des pores est divisé par 4 ou 5. Pour EMBA-1, la diminution du volume poreux accessible par le mercure est de l'ordre de 14 à 30 % et le rayon modal est divisé par 3. A la succion maximale appliquée (~305,5 MPa), EMBA-1 montre une distribution porale bimodale, qui pourrait être due à la microfissuration. Le faible déplacement du rayon modal d'accès de pores de EMBA-1 par rapport à celui de EAVR-0 peut être attribué à la rigidité de la structure provenant de la présence des carbonates comme nous l'avons suggéré précédemment ;
- Les modifications les plus importantes de la distribution porale se produisent pour des succions inférieures à 30 MPa. On a noté dans le chapitre 2 que EAVR-0 et EMBA-1 présentent une limite de retrait effective de 14,5 % et 23 % correspondant respectivement à une succion de 13 MPa et 30 MPa. Ceci montre que les modifications significatives de distribution porale se produisent à l'état saturé ou quasiment saturé, se traduisant par des déformations volumiques (tassement) du sol à l'échelle macroscopique.

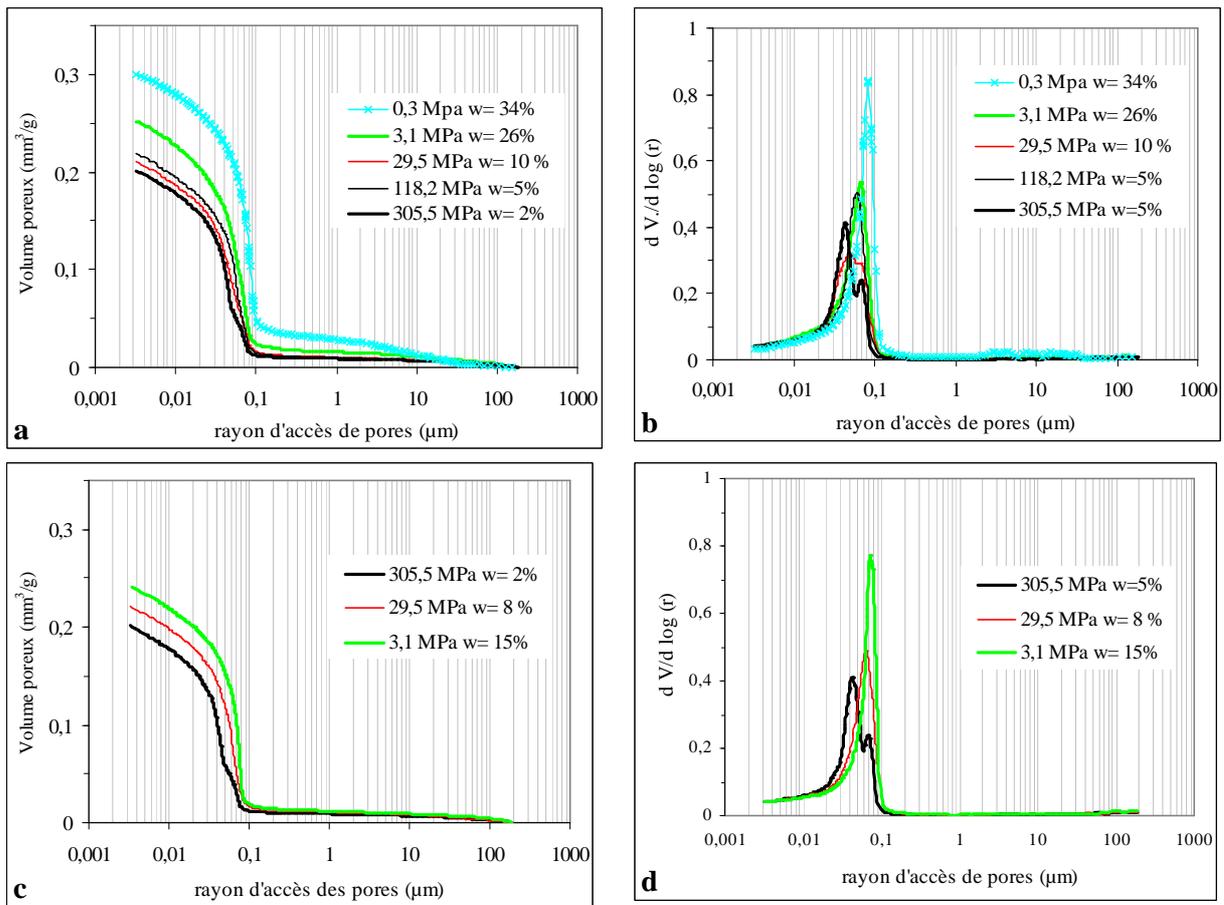


Figure 5.2.37 : Courbes cumulées (a) et dérivées (b) de distribution des accès de pores de EMBA-1 au cours du drainage à différentes succions ; Courbes cumulées (c) et dérivées (d) de distribution des pores de EMBA-1 au cours de la réhumidification à différentes succions

- Au-delà de 30 MPa, la succion n'entraîne pas de déformations microstructurales significatives pour EAVR-0, puisque les courbes de distributions porales sont quasiment confondues (Figure 5.2.36 a et b). Par contre, pour EMBA-1, les résultats montrent des déformations microstructurales faibles mais progressives même pour des succions supérieures à 30 MPa, la distribution porale (Figure 5.2.37 a et b) diminue légèrement à chaque palier de succion croissant.
- Les succions élevées produisent des tassements des petits pores sans une modification significative de la distribution de leurs rayons d'accès. Ceci renforce l'idée qu'au-delà d'un seuil de succion, les déformations deviennent négligeables et que dans les sols secs l'effet de la succion sur la déformation volumique et la résistance du sol est minimale (Delage et Graham, 1995) ;
- Les courbes de distribution porale obtenues lors du remouillage, montrent que les déformations microstructurales après un cycle de drainage-réhumidification sont quasiment réversibles dans la gamme de succion comprise entre 30 et 305 MPa (Figure 5.2.36 c et Figure 5.2.37 c). En deçà de 30 MPa un gonflement est observé et les déformations microstructurales ne sont plus totalement réversibles.

5.2.4.2.e Considérations sur les résultats obtenus par porosimétrie au mercure

Les résultats obtenus par porosimétrie au mercure montrent que les sollicitations hydriques sont accompagnées par une transformation progressive et irréversible de la microstructure. Cette évolution dépend du taux de déformation (retrait-gonflement) subi par le sol. Ainsi, pour les Argiles vertes de Romainville, cette transformation est beaucoup plus évidente que pour les Marnes bleues d'Argenteuil.

L'analyse des résultats d'essais porosimétriques d'échantillons lyophilisés d'AVR intact et sous forme de colluvions nous conduit à faire les observations suivantes :

- A l'état naturel, EAVR-0 ne présente qu'une seule famille dominante de pores bien classés vers les très faibles rayons (0,07 μm), les porosités inter et intra amas argileux sont confondues, caractérisant une texture matricielle argileuse. Le caractère unimodal de la courbe porosimétrique correspond au chevauchement des courbes de distribution des seuils d'accès des deux familles de pores, la dimension des plus petits seuils de pores inter amas étant du même ordre de grandeur que celle des plus gros pores intra amas ;
- Par contre, les courbes de distribution de pores d'EAVR-1 et des colluvions argileuses (EAVR-C) sont bimodales. Une famille prépondérante apparaît vers les faibles rayons, qui correspond à la porosité intra-amas argileux. Une déstructuration des colluvions argileuses due au remaniement par les cycles climatiques successifs séchage-humidification favorise l'apparition de particules argileuses dispersées ou sous forme d'amas de quelques particules ;
- A l'état naturel, WAVR-0 présente une distribution porale mal classée (taille des pores très étendue) qui pourrait être liée à une teneur en eau plus élevée responsable d'un certain degré de gonflement.

L'analyse des résultats des essais porosimétriques des échantillons lyophilisés de MBA montrent que le gonflement n'a pas affecté la taille des pores et très peu le volume poreux de MBA intact alors que MBA remanié enregistre une forte augmentation de la porosité en taille

et en volume. Cette différence de comportement entre MBA intact et remanié corrobore les résultats obtenus sur les essais oedométriques. Ceci s'explique par le fait que les carbonates présents en grande quantité dans MBA contribuent à l'édification d'un squelette semi-rigide qui s'oppose au gonflement, mais qui est détruit par le remaniement au laboratoire.

Le gonflement (cyclique ou non) est accompagné par une augmentation du volume poreux et du rayon moyen d'accès de pores supérieur à $0,04 \mu\text{m}$ essentiellement, qui correspond aux macropores (pores amas argileux dans le cas d'AVR). La microporosité (porosité intra-amas) ne varie pas ou très peu au cours du gonflement. L'augmentation du volume poreux au cours du gonflement correspond à une augmentation de la porosité piégée, principalement la macroporosité.

Les rayons d'accès de pores mesurés en porosimétrie sont inférieurs aux rayons des gros pores observés au MEB en particulier dans les sols gonflés. Cette différence peut être attribuée au fait que l'accès de ces pores se fait par les vides ménagés dans les amas argileux qui cloisonnent l'espace poral. Cette hypothèse est confirmée par une très forte porosité piégée.

5.2.5 Conclusion générale concernant l'étude de la microstructure

Les résultats énoncés dans ce chapitre permettent de se prononcer sur les microstructures des sols étudiés et l'influence du retrait-gonflement sur leurs structures internes.

Les premières conclusions tirées à partir de l'observation au microscope électronique à balayage sont corroborées par les résultats obtenus en porosimétrie au mercure.

Les observations au MEB et l'analyse porosimétrique mettent en évidence pour les Argiles vertes de Romainville intactes une texture matricielle qui peut être hétérogène (EAVR-1 et EAVR-C) avec un arrangement préférentiel des minéraux parallèlement au litage (EAVR-0). Les Marnes bleues d'Argenteuil sont caractérisées globalement par une texture en squelette, hétérogène et par endroit matricielle où les grains de calcite sont dispersés et emballés dans des minéraux argileux. Les deux formations intactes présentent globalement des courbes de distribution porales unimodales.

Au cours du gonflement, l'étude microstructurale de l'Argile verte de Romainville met en évidence

- une augmentation de la porosité en taille et en volume au cours de l'hydratation du matériau naturel et remanié par ouverture progressive de la porosité inter et intra amas argileux ;
- une transformation progressive et irréversible de la microstructure au cours des cycles successifs séchage-humidification, qui se traduit par une augmentation du rayon moyen d'accès de pores de la famille inter-agrégat jusqu'à un certain niveau (5ème cycle) et une distribution qui tend vers un meilleur classement.

Au cours du séchage ou de l'application de succions croissantes, la microstructure subit les phénomènes inverses, une tendance au tassement de l'édifice textural qui se traduit par une

diminution globale du volume poreux et par une variation du spectre de porosité, qui n'affectent essentiellement que la porosité inter amas argileux.

Dans le cas des Marnes bleues d'Argenteuil, le gonflement n'a pas affecté la taille des pores et très peu affecté le volume poreux de MBA intact alors que MBA remanié enregistre une forte augmentation de la porosité en taille et en volume. Ceci peut être attribué à la présence des carbonates en grande quantité à l'état naturel contribuant à l'édification d'un squelette semi-rigide, qui est néanmoins fragile puisque détruit par le remaniement. Ce squelette s'oppose au gonflement des argiles piégées dans les pores entre les grains ou dans les réseaux de calcite.

Les cycles successifs de séchage/humidification entraînent une évolution de la microstructure beaucoup plus faible que celle observée pour AVR. Ils sont responsables de ruptures localisées des liens carbonatés permettant un gonflement ponctuel des minéraux argileux.

La déstructuration du sol facilite le passage de l'eau vers les argiles et ainsi leur permet d'exprimer leurs propriétés de gonflement, comme c'est le cas pour le sol remanié. Ceci montre donc l'importance de la microstructure du sol par rapport au phénomène de retrait-gonflement. Il est à remarquer que cette conclusion s'accorde parfaitement avec celles de Le Roux (1972), Pejon et al. (1997), Bauer-Plaindoux et al. (1997), et Serratrice (2007). En effet, ces auteurs ont remarqué que la seule connaissance de la composition minéralogique des marnes ne permet pas d'expliquer le comportement de ces matériaux en présence d'eau et que leur microstructure joue un rôle.

Chapitre 6 Conclusions générales et perspectives

Ce travail s'est inscrit dans le contexte des préoccupations actuelles liées aux sécheresses géotechniques. L'objectif général de cette recherche était d'apporter une contribution à la compréhension et à la caractérisation du retrait-gonflement des sols argileux et marneux, à partir de l'étude de deux formations argileuses reconnues comme étant responsables de nombreux dommages observés sur le bâti, en Île-de-France. L'étude a comporté plus particulièrement, d'une part, une caractérisation minéralogique, géotechnique, hydrique et microstructurale des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil ; d'autre part, des essais hydromécaniques cycliques couplés à l'analyse microstructurale afin d'étudier le comportement et l'évolution de ces matériaux au cours de sollicitations hydriques cycliques.

L'analyse bibliographique initiale, réalisée dans le cadre de cette thèse, a permis de souligner l'importance d'une identification minéralogique, microstructurale et géotechnique détaillée des sols sensibles au retrait-gonflement, d'une étude précise des processus de retrait-gonflement au niveau microscopique et macroscopique, d'une analyse des différents paramètres jouant un rôle dans ces processus. Elle a permis aussi de rappeler les différentes techniques expérimentales de caractérisation de l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement. Elle a aussi permis de mettre en évidence la complexité du phénomène de retrait-gonflement, surtout à l'échelle microscopique en raison de nombreux mécanismes impliqués (adsorption, osmose, capillarité). Ces mécanismes ont été décrits et présentés d'un point de vue théorique et les approches de modélisation développées ont été discutées.

Cette analyse bibliographique a été présentée en annexe du mémoire de thèse. De ce fait, le premier chapitre est consacré à la présentation des matériaux étudiés et des résultats d'ensemble des essais de caractérisations minéralogiques et géotechniques réalisés sur des échantillons des deux formations, prélevés dans la carrière de Cormeilles-en-Parisis (à l'Ouest de Paris) et dans la carrière de Villeparisis-Le Pin (à l'Est de Paris). Dans les chapitres 2, 3 et 4, les résultats des essais de transferts hydriques et hydromécaniques, et dans le chapitre 5 les résultats d'analyse structurale et microstructurale ont été présentés.

L'analyse de l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus permet d'énoncer plusieurs caractéristiques principales des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil.

6.1 Caractérisations minéralogiques et géotechniques

Les résultats des analyses minéralogiques montrent que les échantillons des deux formations, les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil, des deux carrières, ont une composition minéralogique voisine. Les Argiles vertes de Romainville sont généralement composées de quartz, de carbonates (calcite et/ou dolomite), de traces de feldspaths et de micas et de minéraux argileux (de l'illite principalement, des smectites et de la kaolinite). Dans les Argiles vertes de l'ouest, on trouve aussi de la chlorite et moins de smectites. Par ailleurs, la comparaison des profils des Argiles vertes de Romainville des deux sites met en évidence une continuité de faciès et la présence de niveaux repères carbonatés. Les minéraux

détritiques (quartz, feldspaths, kaolinite) témoignant d'un apport sédimentaire d'origine continentale diminuent de la base vers le sommet de la formation au profit d'une sédimentation à caractère marin plus prononcé (carbonates, smectites), accompagnée d'un enrichissement en magnésium (dolomite).

Les Marnes bleues d'Argenteuil contiennent des carbonates (calcite) majoritairement, du quartz, des traces de pyrite et des minéraux argileux (de l'illite en majorité, des smectites et en plus faible proportion de la kaolinite). Les Marnes bleues inférieures, par contre, contiennent essentiellement des argiles fibreuses (attapulgite principalement), une faible quantité de smectite et d'illite, la kaolinite étant très peu ou pas représentée. Le pourcentage du quartz augmente du bas vers le haut de la formation.

Les résultats d'analyse granulométrique montrent que les deux formations ont une granulométrie fine (plus de 78 % inférieurs à 2 μm). Les sols correspondants sont plastiques, voire très plastiques, peu denses avec une porosité élevée comprise entre 39 et 50 %. Les limites de retrait obtenues par différentes méthodes ont permis de mettre en évidence l'importance de la microstructure de ces sols sur le processus de retrait. Pour les Argiles vertes de Romainville, la limite de retrait obtenue à partir d'un sol remanié et la limite de retrait effective obtenue par les différentes méthodes (à savoir par mesure de variation de hauteur, de volume et par l'analyse d'image) sont comparables. Cependant, pour les Marnes bleues d'Argenteuil, la limite de retrait déterminée à partir des sols remaniés donne des valeurs plus faibles que celles obtenues sur les sols intacts. Ceci est expliqué par le fait que la semi-rigidité de la microstructure due à la présence d'un réseau de calcite très dense s'oppose au retrait des argiles dans le sol intact. Néanmoins, lorsque le sol est remanié, la rupture des liaisons carbonatées entre les minéraux permet aux argiles de se rétracter librement.

Les Marnes bleues présentent des indices de plasticité I_p et de retrait $I_R = w_L - w_R$ supérieurs à ceux des Argiles vertes, indiquant ainsi un pouvoir de gonflement légèrement plus important selon les différentes classifications de susceptibilité au retrait-gonflement des sols gonflants existant dans la bibliographie. Or les résultats obtenus sur les essais de gonflements libres démontrent le contraire, mettant ainsi en évidence l'insuffisance de ce type de classifications qui ne prend pas en compte le rôle prépondérant de la microstructure sur le phénomène de retrait-gonflement des sols et néglige souvent le rôle de l'état initial des matériaux (densité, teneur en eau).

6.2 Caractéristiques hydriques

L'étude expérimentale entreprise sur le comportement des sols étudiés en fonction de sollicitations hydriques ou mécaniques a nécessité de connaître, au préalable, les relations liant le potentiel de l'eau interstitielle (la succion) à des grandeurs caractéristiques que sont la teneur en eau, le degré de saturation et l'indice des vides. L'analyse des transferts hydriques menée conjointement avec la mesure du volume des échantillons a montré la bonne homogénéité des matériaux vis-à-vis des résultats de transfert hydrique et de variation de volume en fonction de la succion imposée. L'essentiel des transferts hydriques a lieu pour des succions imposées comprises entre 1 et 305 MPa. Les chemins de drainage et d'humidification sont quasi réversibles pour des succions supérieures à 100 MPa et présentent un phénomène d'hystérésis pour des succions plus faibles.

Les courbes de l'indice des vides en fonction de la teneur en eau montrent un aspect bilinéaire typique d'une courbe de retrait. L'analyse des courbes de succion-teneur en eau, succion-degré de saturation et succion-indice des vides a montré que les déformations importantes se réalisent pour des succions inférieures à 15 MPa dans le cas des Argiles vertes de Romainville et 30 MPa dans le cas des Marnes bleues d'Argenteuil, pour lesquelles il existe une continuité du film d'eau entre les particules ou amas argileux et qui sont le siège de la formation de ménisques. Les forces de tension superficielle, au niveau de ces ménisques, provoquent le rapprochement des constituants entre eux, ce qui se traduit par une réduction de volume à l'échelle macroscopique. Au delà de 15 MPa pour les Argiles vertes de Romainville (30 MPa pour les Marnes bleues d'Argenteuil) l'augmentation de la succion n'entraîne pas de modifications très importantes sur l'arrangement microstructural.

La limite de retrait et le point d'entrée d'air sont proches dans le cas des Argiles vertes de Romainville. Par contre, ils sont éloignés l'un de l'autre pour la Marne bleue d'Argenteuil. Encore une fois, cette différence est liée au fort pourcentage de carbonates (microstructure) dans les Marnes bleues d'Argenteuil, à l'origine d'un squelette semi-rigide s'opposant en partie au retrait, ce qui confère à ces marnes un comportement de sol très raide, alors que les Argiles vertes de Romainville ont un comportement de sol plastique.

Ces observations sont corroborées par les porosimétries au mercure réalisées sur des échantillons soumis à différentes succion imposées. En phase de drainage, l'augmentation de la succion allant jusqu'à 30 MPa a pour conséquence un tassement de l'édifice microstructural avec une diminution globale du volume poreux associée à une diminution des rayons moyens d'accès de pores. Au-delà de 30 MPa, la succion n'entraîne pas de déformations microstructurales significatives pour les Argiles vertes de Romainville. Par contre, pour les Marnes bleues d'Argenteuil, les résultats montrent des déformations microstructurales faibles mais progressives même pour des succions supérieures à 30 MPa, la distribution porale diminuant légèrement à chaque palier de succion croissant. Par ailleurs, les déformations microstructurales, après un cycle de drainage-réhumidification, sont quasiment réversibles dans la gamme de succion comprise entre 30 et 305 MPa. En deçà de 30 MPa un gonflement est observé et les déformations microstructurales ne sont plus totalement réversibles.

6.3 Essais de gonflement

Les mesures du taux de gonflement libre et de la pression de gonflement ont été réalisées dans des moules œdométriques conventionnels. Les résultats obtenus montrent une dispersion due aux variations des conditions initiales des sols (teneur en eau, densité sèche), de teneur en carbonate, de la charge appliquée et du chemin de contrainte appliqué. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que l'évolution du taux de gonflement vertical ($\Delta H/H_0$) en fonction du temps suit une loi hyperbolique.

Globalement, le taux de gonflement des sols, mesuré sous un même poids de piston, augmente avec une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau initiale. Les Argiles vertes montrent un fort gonflement par rapport aux Marnes bleues. En général leur taux de gonflement oscille entre 9 % et 27%. Le taux de gonflement des Marnes bleues intactes est le plus souvent inférieur à 2 % (sauf pour les échantillons de E-MBA-01 où il peut atteindre une dizaine de %). Cette valeur n'évolue pas malgré une large gamme de teneurs en

eau initiales (23 % - 40 %) et de teneur en carbonate (27 % à 64 %). Cependant, à teneurs en eau et poids volumiques secs voisines et pour un même poids du piston, les échantillons remaniés présentent des taux de gonflement bien supérieurs à ceux des échantillons intacts. Ces résultats permettent de mettre en évidence l'importance de la microstructure des sols, en particulier de la présence de liaisons ou de cimentation qui jouent un rôle important dans l'amplitude des variations de volume observées au cours de gonflement. La rupture des liaisons entre les minéraux entraîne une déstructuration du sol qui facilite l'accès de l'eau aux argiles et ainsi leur permet d'exprimer pleinement leur aptitude au gonflement. Ce raisonnement est en accord avec les remarques faites sur les courbes de rétention et l'évolution texturale. La particularité de EMBA-01 est liée à la microstructure, les carbonates n'ayant pas dans ce cas une fonction de liant entre les grains.

Les mesures de la pression de gonflement ont été réalisées suivant deux méthodes : essai de gonflement libre, puis chargement par paliers et essai de gonflement à volume constant. Les résultats obtenus montrent que, d'une méthode à l'autre, les valeurs de la pression de gonflement mesurées sont assez différentes. Cette observation confirme la nature non intrinsèque du paramètre de gonflement. Les essais de gonflement à volume constant ont permis de mesurer des pressions de gonflement comprises entre 600 et 900 kPa pour les Argiles vertes de l'Est, entre 160 et 210 kPa pour les Argiles vertes de l'Ouest, entre 150 et 235 kPa pour les Marnes bleues, et environ 450 kPa pour les échantillons EMBA-01. La dispersion des valeurs de pression de gonflement obtenues pour EMBA-1 est due à la fois à la variabilité des conditions initiales, mais aussi à la variabilité de la composition minéralogique (teneur en carbonates) et aux effets de structure (marnes litées ou non). Les valeurs les moins élevées sont mesurées pour les échantillons qui sont plus compacts, plus indurés et plus carbonatés.

L'étude menée sur la prévision du taux et de la pression de gonflement, en privilégiant les modèles basés sur des paramètres faciles à déterminer en laboratoire, a montré que les modèles de prévision ne sont pas automatiquement applicables à des sols autres que ceux qui ont servi à leur établissement. Globalement, les résultats des calculs effectués avec l'ensemble des modèles diffèrent des mesures.

6.4 Sollicitation hydriques cycliques

Les cycles successifs d'imbibition totale-séchage complet appliqués sous faibles contraintes verticales constantes ont permis de mettre en évidence la non réversibilité partielle des déformations de gonflement-retrait. Les résultats obtenus sur des éprouvettes soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet montrent que la fissuration de l'échantillon au premier séchage, en augmentant la perméabilité du sol, influence la cinétique de gonflement lors du cycle suivant. Pour chaque sollicitation cyclique, une stabilisation des déformations s'amorce à partir du troisième ou quatrième cycle. Cependant, l'ensemble des échantillons présente une augmentation du gonflement cumulé avec les cycles. Au cours de cycles, le retrait a très peu évolué. La déformation due au retrait-gonflement n'est donc pas complètement réversible.

Encore une fois, la microstructure des sols, en particulier la présence ou non de liaisons ou de cimentation, joue un rôle important dans les variations de volume observées au cours des

cycles. En particulier, pour les Marnes bleues d'Argenteuil, il apparaît que la clé de la compréhension des propriétés de gonflement réside dans la microstructure du matériau. Dans le cas où la phase carbonatée empêche l'argile d'exprimer ses propriétés, on constate que le potentiel de gonflement de ce matériau est faible même après des sollicitations hydriques cycliques. Ceci est corroboré par l'étude microstructurale.

6.5 Etude de fissuration

Les résultats d'essais de séchage et d'humidification mettent en évidence des différences dans le processus de fissuration des deux formations, mais aussi pour une même formation entre l'état intact et remanié. Ils montrent ainsi la complexité du phénomène de fissuration. Dans le cas des Argiles vertes de Romainville intactes le processus de fissuration est directement lié à la réouverture d'anciens plans de micro-cisaillement. Par contre, l'Argile verte remaniée, quelle que soit la géométrie de l'éprouvette, ne s'est pas fissurée.

La Marne bleue d'Argenteuil intacte ne présente aucune fissure au cours des cycles de séchage-imbibition quelle que soit la teneur en eau. Cette absence de fissures est attribuée au squelette semi-rigide, formé par les carbonates, ce qui contrarie les variations de volumes. A l'inverse, la Marne bleue remaniée développe des fissures, formant des polygones, réparties sur l'ensemble de la surface pour plusieurs configurations d'éprouvette. La raison qui peut être invoquée, concernant la différence de comportement avec le matériau intact, est la destruction au cours du remaniement du squelette semi-rigide formé par les carbonates qui sont alors dispersés dans la matrice argileuse et vont jouer le rôle inverse des argiles en créant des différences de comportement avec les argiles plus plastiques, entraînant ainsi l'ouverture de fissures.

6.6 Etude microstructurale

L'évolution de texture/microstructure des sols au cours du gonflement a été analysée à l'aide de deux techniques complémentaires : la microscopie électronique à balayage (MEB) et la porosimétrie par injection de mercure.

Les observations au MEB ont montré que les Argiles vertes ont à l'état naturel une texture matricielle, caractérisée par l'assemblage compact de particules argileuses formées d'illite, de kaolinite et d'interstratifiés illite-smectite. Au cours du gonflement cette microstructure évolue en une microstructure en agrégats (amas argileux) séparés par des pores de géométrie plutôt bidimensionnelle. Au cours des cycles successifs la taille des agrégats diminue, l'épaisseur des pores augmente, et une déstructuration des agrégats favorisant l'apparition d'amas de quelques particules ou de particules dispersées est observé.

A l'état naturel les Marnes bleues ont un aspect compact et assez hétérogène. Les minéraux argileux se présentant, soit disséminés dans le matériau et pincés entre les grains de calcite ou dans des micropores délimités par un réseau de calcite très dense (c'est le cas pour EMBA-1 et EMBA-0), soit libres (c'est le cas pour EMBA-01). Les observations au MEB montrent que les modifications de microstructures sont moins importantes pour les Marnes bleues d'Argenteuil. En effet, des cycles de gonflement faible n'ont pas provoqué de perturbations significatives sur la microstructure du sol.

Par injection de mercure deux classes de pores ont été mises en évidence : la microporosité (rayons d'accès inférieurs à $0,04\ \mu\text{m}$), et la macroporosité (rayons d'accès supérieurs à $0,04\ \mu\text{m}$). Il apparaît que les micropores ne varient pas ou peu au cours de gonflement. L'augmentation de la porosité en taille et en volume est due à l'augmentation de la macroporosité (porosité inter amas argileux). Les résultats d'étude par porosimétrie au mercure ont également permis de mettre en évidence une transformation progressive et irréversible de la microstructure au cours des cycles successifs de séchage-humidification, qui se traduit par une augmentation du rayon d'accès des macropores.

6.7 Perspectives

Le travail entrepris dans le cadre de cette thèse n'a pu être exhaustif concernant le comportement hydromécanique les deux formations étudiées. Il reste encore de nombreux sujets de recherche en suspens.

Un échantillonnage fin des Marnes bleues d'Argenteuil à l'image de celui des Argiles vertes de Romainville permettrait d'analyser la variabilité verticale et horizontale de la formation et de bien caractériser cette formation dont la teneur en carbonates est très variable, sujet important car ces carbonates jouent un rôle important sur le comportement de ces sols vis-à-vis des phénomènes de retrait-gonflement. En effet, nous ne savons pas à partir de quel seuil et suivant quelle répartition ces carbonates jouent un rôle déterminant. Des éléments de réponse pourront être obtenus en étudiant précisément la répartition des minéraux argileux et des carbonates au sein de la microstructure de ces matériaux.

Les conductivités hydrauliques et thermiques des sols étudiés sont inconnues. Or ces paramètres sont indispensables dans les modélisations des échanges sol-atmosphère et dans la modélisation du comportement mécanique des sols gonflants.

Dans ce travail, l'étude de gonflement a été menée sous une charge faible. L'étude du comportement de ces sols sous une charge et/ou une succion contrôlée dans une gamme étendue de valeurs, entre un état saturé et un état sec, permettrait d'améliorer l'analyse du comportement de ces sols sous des conditions proches de la réalité.

Les sols gonflants héritent, en plus, de particularités liées aux propriétés physico-chimiques de leurs minéraux, à l'hétérogénéité, à la fissuration et à l'anisotropie de microstructure, etc. Il serait donc intéressant d'effectuer des mesures in situ des déformations volumiques et du changement de la teneur en eau lors des cycles de séchage-humidification dans les sols sensibles au retrait-gonflement. En effet, dans notre étude de sollicitations hydriques cycliques, les éprouvettes sont soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage complet, ce qui représente un cas extrême. Disposer de mesures in situ de la teneur en eau et de la température permettrait de développer de nouveaux essais cycliques plus proches des sollicitations hydriques et thermiques naturelles. A cet effet, développer des recherches dans le cadre du changement climatique pour mieux caractériser les événements extrêmes : en particulier, intensité et durée des sécheresses exceptionnelles, semblerait particulièrement intéressant.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

(commune au corps de la thèse et à la synthèse bibliographique placée en annexe)

Abdullah W.S, Alshibli K.A, Al-Zou'bi M.S (1999) *Influence of pore water chemistry on the swelling behaviour of compacted clays*. Applied Clay Science, vol. 15, pp. 447-462

AFNOR (1993) *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau*. NF P 94-051

AFNOR (1993) *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol. Méthode chimique*. NF P 94-055

AFNOR (1995) *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration*. NF P 94-052-1

AFNOR (1995) *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage*. NF P 94-050

AFNOR (1995) *Sols : Reconnaissance et essais. Essai de dessiccation : Partie 1. Passant 400µm*. XP P 94-060-1

AFNOR (1995) *Sols : Reconnaissance et essais. Essai de dessiccation : Partie 2. Sol non remanié*. XP P 94-060-2

AFNOR (1995) *Sols : Reconnaissance et essais. Masse volumique des sols fins*. NF P 94-060-1

AFNOR (1995) *Sols : Reconnaissance et essais. Masse volumique des particules solides*. NF P 94-060-2

AFNOR (1995) *Sols : Reconnaissance et essais. Essai de gonflement à l'oedomètre*. XP P 94-091

AFNOR (1996) *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en carbonate. Méthode du calcimètre*. NF P 94-048

AFNOR (1998) *Sols : Reconnaissance et essais. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux*. NF P 94-068

AFNOR (1998) *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau. Méthode par calcination*. XP P 94-047

AFNOR (1998) *Sols : Reconnaissance et essais. Essai oedométrique. Partie 1: Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers*. XP P 94-090-1

Albrecht, B.A. & Benson, C.H. (2001) *Experimental research on desiccation Cracks in Soil*. Research Report 66. Wilmette, Illinois: US Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment

Allam M. M. Sridharan A. (1981) *Effect of wetting and drying on shear strength*. Jour. Geotech. Engineer. Div., ASCE, vol. 107, n°GT4, pp. 421-437

Al-Homoud A. S., Basma A. A., Malkawi A. I. H. (1995) *Cyclic swelling behaviour of clays*, Jour. Geotech. Engineer. 121 (7), pp. 562-565

Al-Mukhtar M. (1995). *Macroscopic behaviour and microstructural properties of a kaolinite clay under controlled mechanical and hydraulic state*. Proceedings of the first international conference on unsaturated soils (UNSAT'95), Paris, Alonso & Delage (eds), vol. 1, pp. 3-9

Al-Mukhtar M., Belanteur N., Tessier D., Vanapalli S.K. (1996) *The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states*. Applied Clay Science, vol. 11, pp. 99-115

Alonso. E. (1993) *Effet des variations de teneur en eau dans les sols compactés*, Rev. Franç. Géotech., n°62, pp. 7-21

Alonso E.E., Gens A., Hight D.W., (1987) *Groundwater effects in geotechnical engineering*. General report in Hanrahan E. T., Orr T. L. L., Widdis T. F. (eds), IX ECSMFE, pp. 1087-1146.

Alonso E.E., Lloret A., Gens A., Battle F. (1989) *A new approach for the prediction of long term heave*. Proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, vol. 1, pp. 571-574.

Alonso E. E., Gens A., Lloret A. (1991) *Double structure model for the prediction of long term movements in expansive materials*. Proc. 7th Int. Conf. Comp. Methods and Adv. In Geomech., vol. 1, pp. 541-548.

Alonso E. E., Gens A., Josa A. (1992) *A unified model for expansive soil behaviour*. 7th Int. Conf. On Expansive Soils, Dallas, vol. 1, pp. 24-29.

Alonso. E. (1993) *Effet des Variations de teneur en eau dans les sols compactés*, Rev. Franç. Géotech., n°62, pp. 7 – 21

Alonso E. E., Lloret A, Gens A. (1995) *Experimental behaviour of highly expansive double-structure clay*. Proceedings of the first international conference on unsaturated soils, Unsat'95, Alonso & Delage (ed.), Presse de l'ENPC Paris, vol. 1, pp. 11-16.

Alonso E. E., Vaunat J., Gens A. (1999) *Modelling the mechanical behaviour of expansive clays*. Engineering Geology, 54, pp. 173-183.

Al-Rawas A. A. McGown A. (1999) *Microstructure of Omani expansive soils*. Can.Geotech. J., 36, pp 272-290

Altemeyer W. T. (1955) *Discussion of engineering properties of expansive clays*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Testing and Materials, vol. 81, n° SM2, pp. 17-19

Arnould M., Audiguier M., Delage P., Pellerin F.M., Struillou R., Vayssade B. (1980) *Etude des sols argileux par la porosimétrie au mercure. Contrôle des variations de texture sous diverses conditions*. Bull. IAEG, N° 22, pp 213-223.

ASTM (1986) *Standard test methods for one – dimensional swell or settlement potential of cohesive soils*, ASTM D 4546 – 85

Audiguier-Marcel M. (1979) *Contribution à l'étude du comportement de l'eau dans les sols en fonction de leur texture*. Mémoire de DEA, Centre de Géologie d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 148 p.

Audiguier-Marcel M.; Delage P. (1987) *Etude Microscopique et porosimétrie de sols fins naturels dans une perspective géotechnique*. Actes de la VII^{ème} Réunion Internationale de Micromorphologie des Sols, Paris, juillet 1985, pp. 493-500

Audiguier M., Geremew Z., Cojean R. (2008) *Relation entre les microstructures de deux sols argileux de la région parisienne et leur sensibilité au retrait-gonflement*. Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris, pp. 235-244

Avila, G.E. (2004) *Estudio de la retraccion y el agritamiento de arcillas. Aplicacion a la arcilla de Bogota*. Doctoral Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

Baker R.,(1981) *Tensile strength, tension cracks, and stability of slopes*. Soils and Foundations, 21 (2) : 1 – 17.

Basma A. A., Al-Homoud A. S., Malkawi A. I. H., Al-Bashabsheh M. A. (1996) *Swelling – Shrinkage behavior of natural expansive clays*. Applied Clay Science, 11, pp. 211-227.

Basma A. A., Al-Homoud A. S., Malkawi A. H., (1995) *Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils*, Applied Clay Science, 9, pp. 355-368.

Bauer-Plaindoux C., Tessier D., et Ghreychi M., (1997) *Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : importance de la relation calcite-argile*. C.R. Acad. Sci. Paris, sciences de la terre et des planets/Earth & Planetary Sciences 326, 231 – 237

Ben Brahim J. (1985) *Contribution à l'étude des systèmes eau-argiles par diffraction des rayons X. Structure des couches insérées et mode d'empilement des feuillet dans les hydrates homogènes à deux couches d'eau de la beidellite Na*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.

Ben Rhaïem H., Tessier D., et Pons C. H. (1986) *Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation – humectation : Partie I. Cas des montmorillonites calciques*. Clay Minerals, 21, pp. 9-29.

Ben Rhaïem H., Pons C.H. & Tessier D. (1987) *Factors affecting the macrostructure of smectites. Role of cation and history of applied stresses*. Proc. Int. Clay Conf. Denver, 292-297.

Besson G., Decarreau A., Manceau A., Sanz J., Suquet H. (1990) *Organisation interne du feuillet : connaissance du feuillet*. Dans A. Decarreau (dir.), Matériaux argileux: Structure, propriétés et applications, Soc. Fr. Min. Cristal., Paris, pp. 7-32

Biarez J., Fleureau J.M., Zerhouni M.I., Soepandji B.S. (1987) *Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification*. Revue Française de Géotechnique, n° 41, pp. 63-71.

Bigot G., Zerhouni M. I. (2000) *Retrait, Gonflement et tassement des sols fins*, Bull. labo. P.et Ch., 229, pp. 105-114.

Bigorre F., Tessier D., Pédro G. (2000) *Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations*. C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes/ Earth and Planetary Sciences 330 : pp 245-250.

Blight G.E. (1997) *Interactions between the atmosphere and the Earth*. Géotechnique. 47(4), p. 715-767

Bohn S. (2006) *Morhogenèse: l'origine des formes*. Sous la dir. de Bourguine P. et Lesne A. Berlin, Collections-Echelles, 325p

Bolt, G. H. (1956) *Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays*. Géotechnique 6, n° 2, 86-93

Börgesson L., Karnland O., Johannesson L. E. (1996) *Modelling of the physical behaviour of clay barriers close to water saturation*. Engineering Geology, 41, pp. 127-144.

Brackley, I.J. (1975) *Swell pressure and free swell in compacted clay*. Proc. 3rd Int. Conf. On Expansive soils, Haifa, Vol. 1, PP. 169 – 176.

Brackley I.J.A. (1983) *An empirical equation for the prediction of clay heave*. Proceedings of the 7th Asian regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, pp. 8-14.

BRE Building Research Establishment. BRE (1980) *The effect of a roof on a fire within a building*. IP 3/80.

Brindley GW, Brown G (1980) *X-ray diffraction procedures for clay mineral identification*. In: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society, London

Bultel F. (2001) *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels*, thèse doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Burdine N.T., (1953) *Relative permeability calculations from pore size distribution data*. Petroleum Transactions, AIME, 198 : 71 – 77.

Caillere S., Henin S. (1956) *La classification des argiles*. XX Congr. Géol. Internat. Mexico (1956), pp. 1-8.

Caillere S., Henin S., Rautureau M., (1982) *Minéralogie des argiles* Tome I et II. Masson, Paris.

Camara L. (1982) *Comportement hydrique et Propriétés de gonflement macroscopique de mélange d'argiles*. Thèse doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Paris.

Cases J.M., François M. (1982) *Etude des propriétés thermodynamiques de l'eau au voisinage des interfaces*. Agronomie : 2,10, pp. 931-938.

Cases J. M., Berend I., Delon J. F., François M., Grillet Y., Michot L., Poirier J.E., Yvon J. (1990) *Quelques aspects de l'étude des propriétés texturales des argiles*. Dans A. Decarreau (dir.), Matériaux argileux: Structure, propriétés et applications, Soc. Fr. Min. Cristal., Paris, pp. 307-342

CEBTP (1991) *Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse*. Guide pratique CEBTP sous l'égide de l'AQC, l'APSAD, l'AFAC, la CCR et la FNB, 3 fascicules

Chantraine J, Autran A, Cavalier C, et coll. (1996) *Carte géologique de la France au millionième*. 6^e édition. Orléans : BRGM

Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Ménilliet F. & Ducreux G.H. (1995) *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle départementale*. Approche

méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. Rapport BRGM n° R39218, 33 p., 6 fig., 1 tab., 4 ann., 1 pl. hors-texte.

Chen F.H. (1973) *The basic physical property of expansive soils.* Proc. 3rd Int. Conf. Expansive soils. Vol.1., pp 17-25

Chen F.H. (1975) *Foundations on expansive soils.* Amsterdam : Elsevier. ISBN : 0-444-41393-6. Developments in Geotechnical Engineering, vol. 12, 280p.

Chen F. H. (1988) *Foundations on Expansive Soil.* Elsevier Science Pub., New York, NY

Chen F. H., Ma G. S. (1987) *Swelling and shrinkage behaviour of expansive clays.* 6th inter. Conf. Expansive soils, New Delhi, pp. 127-129

Cho W. J., Lee J. O., Kang C. H. (2000) *Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository.* Annals of Nuclear Energy, 2000, pp. 1271-1284.

Clément C. (1988) *Etude de coulis hydrauliques pour la rétention de cations polluants : Pb, Cd, Hg, Sr, Cs.* Thèse de doctorat de l'ENSMP, 40p.

Colina H. E. (1992) *Maîtrise de la fissuration de peau du béton : étude géométrique et modélisation.* Thèse doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 212 p.

Collins K., McGown A. (1974) *The form and function of microfabric features in a variety of natural soils.* Géotechnique 24, n° 2, pp 223-254

CRC Handbook (1999) *Handbook of Chemistry and Physics.* 80th ed, Editor-in- Chief: David R. Lide, CRC press,

Cui Y.J., Yahia-Aissa M., Delage P. (2002) *A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling soils.* Engineering Geology 64, pp. 233-250.

Cui Y. J., Loiseau C., Delage P. (2002) *Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration.* Unsaturated soils, Jucá, de Campos & Marinho (eds), vol 2, pp.593-598

Cui Y. J., Delage P. (2003) *Sols non saturées : applications au calcul des ouvrages.* Techniques de l'ingénieur, traité construction, C 303-1, 27 p.

Cuisinier O. (2002) *Comportement hydromécanique des sols gonflants.* Thèse de l'Ecole Nationale Supérieur de Géologie de Nancy, 177p

Dakshanamurthy V. & Raman V. (1973) *A simple method of identifying an expansive soil.* Soils and foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 13,n° 1,pp. 97-104.

Dakshanamurthy, V. (1978) *A new method to predict swelling using a hyperbolic equation,* Geotechnical Engineering, vol. 9, pp 29-38.

Daupley X. (1997) *Etude du Potentiel de l'eau Interstitielle d'une Roche Argileuse et de Relations entre ses Propriétés Hydriques et Mécaniques.* Thèse de l'ENSMP, 172p.

Day R. W (1995) *Ultimate Density of a compacted clay subjected to cycles of wetting and drying.* Environmental & Engineering Geoscience, vol. I, n° 2, pp. 229-232

- Day R. W. (1995)** *Discussion on swell-shrink behavior of compacted clay*, J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE, 123(8), pp. 385-386.
- Day R. W. (1994)** *Swell-shrink behavior of compacted clay*. J. Geotechnical Eng., ASCE, 120(3), pp. 618-623.
- Delage P. (1979)** *Etude du milieu poreux et de la texture d'argiles sensible du Québec*. Thèse Doctorat, Université Paris VI, Ecole des Mines Paris.
- Delage P., Lefebvre G. (1984)** *Study of the structure of a sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation*, Can. Geotech. J. 21, pp. 21-35.
- Delage P., Pellerin F.M. (1984)** *Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du Québec*. Clay Minerals 19:151-160
- Delage P., Graham J. (1995)** *Mechanical behaviour of unsaturated soils: Understanding the behaviour of unsaturated soils requires reliable conceptual models*. Proceedings of the first international conference on unsaturated soils (UNSAT'95), Paris, Alonso & Delage (eds), pp.1223-1256.
- Delage P., Howat M. et Cui Y.J. (1998)** *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*. Engineering Geology (50) 1-2, p. 31-48
- Delage P., Cui Y. J., (2000)** *L'eau dans les sols non saturés*, Techniques de l'ingénieur, traité construction, C 301-1, 20 p.
- Delage P., Cui Y. J. (2001)** *Comportement mécanique des sols non saturés*. Techniques de l'Ingénieur, C302, traité construction, volume C2.
- De Calle (1977)** *Structure des vermiculites, facteurs conditionnant les mouvements des feuillets*. Thèse univ Paris VI.
- Diamond S. (1970)** *Pore size distribution in clays*. Clays and Clay minerals, 18, pp 7-23.
- Dif A. E., Bluemel W. F. (1991)** *Expansive soils under cyclic drying and wetting*. Geotech. Testing. Jour., 14 (1), pp. 96-102.
- Dixon D.A., Gray M.N. & Graham J. (1996)** *Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and USA*. Environmental Geotechnics, vol. 1, pp. 43-48.
- Donsimoni M., Clozier L., Motteau M., Vincent M. (2003)** *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne*. BRGM/RP-52224-FR, 136P
- Donsimoni M., Hatton C., Giraud F., Vincent M. (2004)** *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-d'Oise*. BRGM/RP-52598-FR, 170P
- Donsimoni M., Kerneis M., Giraud F. avec la collaboration de Imbault M. et Le Roy S.(2006)** *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Seine-et Marne*. Rapport BRGM/RP-53212-FR, 114 p., 38 ill., 3 ann., 3 pl. h.t., 1 CD-Rom.

Durand C., Forsans T., Ruffet C., Onaisi A., Audibert A. (1995) *Influence of clays on borehole stability: a literature survey , part one: Occurrence of drilling problems, physico-chemical description of clays and of their interaction with fluids.* Rev. IFP, Vol. 50, n° 2, Mars-Avril 1995.

Dyer M and Coulson B. (2003) *Fine fissuring of clay fill materials for flood defence embankments.* In Proceedings of the International Conference "From Experimental Evidence Towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils" Weimar, Germany, Vol.1, pp. 413 - 419

El-Sohby M. A., Rabba E. A. (1981) *Some factors affecting swelling of clayey soils.* Geotechnical engineering, vol. 12, pp. 19-39

Fagel N. (2008) *Géologie des argiles, cours en ligne, Université de Liège,*
<http://www2.ulg.ac.be/urap/cours.htm>

Fang. H.Y., Failmezger C.A., and Evans, J.C. (1983) *Mechanisms of soil cracking,* in proceedings, 20th Annual Meeting of Society of Engineering Sciences, New Delaware, pp.156 - 157

Fang, H.-Y. (1994). *Cracking and fracture behavior of soils.* ASCE, *Geotechnical Special Publication No. 43 — Fracture Mechanics, Applied to Geotechnical Engineering, Oct. 9–13* (Edited by L.E. Vallejo and R.Y. Liang), Atlanta, Georgia, 102–117.

Fredlund D.G., & Xing A., (1994) *Equations for the soil water characteristic curve.* Canadian Geot. Jour., 31 : 521 – 532.

Glaser R (1953) *Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables.* Thèse de doctorat d'état. Univ Paris VI.

Gens A., Alonso E. E. (1992) *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays.* Can. Geotech. J. 29, pp 1013-1032

Gillott J. E. (1970) *Fabric of Leda Clay investigated by optical, electron optical, and x-ray diffraction methods.* Engineering Geology, 4, pp 133-153

Giroud J.P. et Bottero A. (1972) *Influence des propriétés physico-chimiques des argiles monominérales sur leur comportement mécanique.* Bull. liaison Labo. P. et Ch. 62, 105 - 116

Google Imagerie (2009) <http://www.google.fr/>

Gouy G. (1910) *Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte.* Journal de physique théorique et appliqué, vol. 9, pp. 457-468

Gray M. N., Cheung S. C. H., Dixon D. A. (1984) *The influence of sand content on swelling pressures and structure developed in statically compacted Na-bentonite.* Atomic energy of Canada Limited, Report 7825, pp. 1-24.

Green-Keely R. (1957) *The montmorillonite minerals. The differential thermal investigation of clays.* R.C. Mackenzie (ed.), Mineralogical Society, London.

Griffiths F., Joshi R. C.(1990) *Clay fabric response to consolidation.* Applied Clay Science, 5 37-66, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam

Gromko G. J. (1974) *Review of Expansive Soils.* J. Geotech. Eng.. Div., vol. 100, GTG, pp. 667-687

Guillot X. (2002) *Couplage entre propriétés microscopique et comportement mécanique d'un matériau argileux*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris

Guiras-Skandaji H. (1996) *Déformabilité des sols argileux non saturés : étude expérimentale et application à la modélisation*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 315 p.

Habib S. A., Karube D. (1993) *Swelling pressure behavior under controlled suction*. Geotech. Test. J., Vol. 16, n° 2, pp. 271-275.

Hallaire, V. (1984) *Evolution des réseaux de fissure lors du retrait d'un sol argileux*. Compte rendu du colloque Fonctionnement hydrique et comportement des sols AFES 1984, 323-327.

Hallaire, V. (1988) *La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I. Description in situ*. Agronomie, 8 (2) 139-145.

Hendricks S.B., Nelson R.A., Alexandre L.T. (1940) *Hydration mechanism of the clay mineral montmorillonite saturated with various cations*. J. Am. Chem. Soc. 62 (6), pp. 1457-1464.

Hillel D. (1988) *L'eau et le Sol*. 2nd ed., Academia-Erasme s.a. pp 1- 85.

Holtz W.G., Gibbs H.J. (1956) *Engineering Properties of Expansive Clays*. Transactions, ASCE, vol. 121, pp. 641 – 677.

Hueckel T.A. (1992) *Water-mineral interaction in hydromechanics of clays exposed to environmental loads: a mixture-theory approach*, Can. Geotech.J., 29, 1071 – 1086

IPCC-GIEC, (2007) *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*, un rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 114p.

Johnson L.D. & Sneath D.R. (1978) *Prediction of potential heave of swelling soils*. Geotechnical Testing Journal, vol.1, pp. 117-124.

Kanno T., Wakamatsu H. (1992) *Water uptake and swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials*. Canadian Geotechnical Journal, 29, pp. 1102-1107.

Kassiff B., Ben Shalom A. (1971) *Experimental relationship between swell pressure and suction*. Géotechnique, vol. 21, N°3, pp. 245-255.

Katti D. R., Shanmugasundaram V. (2001) *Influence of swelling on the microstructure of expansive clays*. Can.Geotech.J., 38, pp 175-182

Komine H., Ogata N. (1992) *Swelling characteristics of compacted bentonite*. Proc. 7th Int. Conf. on Expansive soils. Vol. 1, pp. 216- 221.

Komine H., Ogata N. (1994) *Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite*. Can. Geotech. J., 31, pp. 478-490.

Komine H., Ogata N. (1996) *Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite*. Can. Geotech. J. 33(1), pp. 11 – 22.

Komine H., Ogata N. (2003) *New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials*. Can. Geotech. J. 40, pp. 460-475.

- Komine H., Ogata N. (2004)** *Predicting swelling characteristics of bentonites*. J. Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE, vol. 130(8), pp. 818-829
- Komornik A., David D. (1969)** *Prediction of swelling pressure of clays*. Proc. ASCE, Journal of Soil Mech. & Found. Div., vol. 95, n° SM1, pp. 209-225
- Konard J.M. & Ayad R. (1997)** *Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations*. Can. Geotech. J. 34: 929 - 942
- Ladd C. C. (1960)** *Mechanisms of swelling by compacted clay*. High Res. Board, bull. 245, pp. 10-26
- Lambe T.W., Whitman R.V (1969)** *Soil Mechanics, series in Soil Engineering*. Jhon Wiley & Sons, Inc., New York.
- Laribi S., Cojean R., Audiguier M., Grambin-Lapeyre C., Geremew Z. (2007)** *Essai d'adsorption de bleu de méthylène : influence de paramètres du protocole expérimental sur la valeur au bleu en fonction de la minéralogie des argiles*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 83-90
- Laribi S., Audiguier M., Cojean R. (2008)** *Assessing shrink/swell properties of two argillaceous soils from the Paris basin: a comparison of cation exchange determination method*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 67, n° 3, 415-427
- Le Roux A. (1972)** *Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture*. Bull. liaison Labo. P. et Ch. 61, 155 - 178
- Le Roux A. (1975)** *Les différentes textures leur influence sur le comportement des sols argileux et marneux*. Géologie Applicata Indrogéologie Vol. X part II, pp. 67-85.
- Lloret A., Villar M. V., Sanchez M., Gens A., Pintado X., Alonso E. E. (2003)** *Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes*. Géotechnique, 53, no.1, pp. 27-40.
- Loiseau C. (2001)** *Transferts d'eau et couplages hydromécaniques dans les barrières ouvragées*. Thèse de l'ENPC, 225p.
- Low P.F. (1980)** *The swelling of clay. II: Montmorillonites*. J. Soil Sci. Soc. Am. 44, n° 4, pp. 667-676
- Lecocq N. and Vandewalle N. (2002)** *Experimental study of cracking induced by desiccation in 1-dimensional systems*. Eur. Phys. J. E 8, pp 445 – 452.
- Magnan J.-P. et Youssefian G. (1989)** *Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 159, pp. 93–104.
- Madsen F. T, Müller-Vonmoos M. (1989)** *The swelling behaviour of clays*, Applied Clay Science, 143-156
- Marcial D. (2003)** *Comportement hydromécanique et microstructural des matériaux de barrière ouvragée*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Mamy J (1968) *Recherche sur l'hydratation de la montmorillonite: propriétés diélectriques et structure du film d'eau*. Thèse doctorat d'Etat Univ Paris.

McConnachie I. (1974) *Fabric changes in consolidated kaolin*. Géotechnique 24, n° 2, pp 207-222

McKeen, R. G. (1992) *A model for predicting expansive soil behavior*. Proc. 7th Int. Conf. on expansive soils, vol. 1, Dallas, pp. 1-6

Mering J (1949) *On the hydration of montmorillonite*. Trans. Farad. Soc., 2B, pp. 205-219.

Mitchell J.K. (1976) *Fundamentals of soil behaviour*. 1ère ed., John Wiley and Sons, New York., 437p.

Mitchell J.K. (1993). *Fundamentals of soil behaviour*. 2ème ed., John Wiley and Sons, New York., 437p.

Montes-Hernandez G. (2002) *Etude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie électronique à balayage environnementale (ESEM) et l'analyse digitale d'images*. Thèse doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg

Morris P.H., Graham J. & Williams D.J. (1992) *Cracking in drying soils*. Can. Geotech. J. 29: 262 – 277.

Mouroux P., Margon P., Pinte J.-C. (1988) *La construction économique sur les sols gonflants*. Manuels et Méthodes, 14, BRGM, France.

Mualem Y. (1976) *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resources Research, Vol. 12, pp. 513- 522

Multon J.L (1991) *Techniques d'analyse et de contrôle dans les industries agro-alimentaires*. Vol. 4, 2ed., Lavoisier-Tec & Doc

Musy A. et Soutter M. (1991) *Physique du sol*. Presses Polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 348p

Norrish K. (1954) *The Swelling of Montmorillonite*. Faraday Soc. Disc, 18, pp. 120-134.

Norrish K. and Raussel Colom, J. A. (1963) *Low angle X- ray diffraction studies of the swelling of montmorillonite and vermiculite*. Clays and Clay Minerals 10, 123-149

Oinuma K., Hayashi H. (1968) *Infrared spectra of clay minerals*. J. Tokyo Univ., Gen. Educ. (Nat. Sci.) n° 9, pp. 57 – 89.

Osipov V. I., Sokolov V.N.(1978) *Relation between the microfabric of clay soils and their origin and degree of compaction*. Bull. Inter. Assoc. Eng. Geology, n° 17, pp. 73-81

Osipov V. I., Sokolov V.N.(1978) *Structure formation in clay sediments*. Bull. Inter. Assoc. Eng. Geology, n° 17, pp. 83-90

Osipov V. I., Sokolov V.N.(1978) *A study of the nature of the strength and deformation properties of clay soils with the help of the scanning electron microscope*. Bull. Inter. Assoc. Eng. Geology, n° 17, pp. 91-94

- Osipov V. I., Bik N. N., Rumjantseva N. A. (1987)** *Cyclic swelling of clays*. Applied clay science 2 (7), pp. 363-374.
- Parcevaux P. (1980)** *Etude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux*. Thèse doctorat, Université Paris VI, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris.
- Péjon O.J., Le Roux A., Guignard D. (1997)** *Comportement à l'eau des roches argilo-marneuses, suivi du gonflement, importance de la minéralogie et des textures*. Bull. AIEG, Paris, 55, 105 – 119.
- Pellerin F.M. (1979)** *La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches*. Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées 106, 105-116.
- Péron H. and Laloui L. (2005)** *An experimental evidence in desiccation cracking in sandy silt*. Advanced experimental unsat. Soil. Mech. Trantino, Romero & Cui (eds), Taylor & Francis Group, London, pp 475- 481.
- Philipponnat G. (1991)** *Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie*. Rev. Franç.Géotech. n° 57, pp. 5-22
- Pons C. H. (1980)** *Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eau-smectites par diffusion aux petits angles du rayonnement synchrotron*. Thèse Dr. Sc. Université. Orléans.
- Pons C. H., Rousseau F., Tchoubar D. (1981)** *Utilisation de rayonnement synchrotron en diffusion aux petits angles pour l'étude du gonflement des smectites. Etude du système eau-montmorillonite-Na en fonction de la température*. Clay Minerals., 16-1, pp. 23-42.
- Pons C.H., Ben Rhayem H., Tessier D. & Clinar C. (1987)** *Apport de la diffusion aux petits angles de rayons X à l'étude de la microstructure des matériaux argileux*. Micromorphologie des sols. Proc. VIIth Working Meeting Soil Micromorphology, Paris, 37-42.
- Popescu M. (1980)** *Behavior of expansive soils with a crumb structure*. 4th Inter. Conf. Expansive Soils, 1, Denver Co., pp. 158-171.
- Pomerol C., Feugueur L. (1974)** *Bassin de Paris*. Ile-de- France, pays de Bray. Guides géologiques régionaux, Masson & Cie, Paris
- Prost R. (1990)** *Relations eau-argile : structure et gonflement des matériaux argileux*. dans A. Decarreau (dir.), Matériaux argileux: Structure, propriétés et applications, Soc. Fr. Min. Cristall., Paris, P. 343-386
- Pusch, R. (1982)** *Mineral – water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na bentonite*. Can. Geotech. J., 19, pp381-387.
- Qi Yun (1996)** *Comportement hydromécanique des argiles : Couplage des propriétés micro-macroscopiques de la laponite et de l'hectorite*. Thèse doctorat, Université d'Orléans.
- Ranganatham et Satyanarayana (1965)** *A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays*. Proceedings of the 6th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, pp. 92-96.
- Ridley A. M., Wray W. K. (1995)** *Suction measurement: a review of current theory and practices*. Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils, Vol. 3, pp. 1293-1322.

- Robinet J. C., Rahbaoui A., Plas F. Lebon P. (1996)** *A constitutive thermomechanical model for saturated clays*. Engineering Geology, 41, pp. 145-149
- Romero E. & Vaunat (200)** *Retention curves of deformable clays*. Experimental Evidence & Theoretical Approaches in Unsaturated soil, Tarantino & Mancuso (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 91 – 106.
- Romero E. (2001)** *Suction controlled techniques*. In NSAT'2001, 4° Simposio Brasileiro sobre Solos Nao Saturados.
- Saiyouri N., Hicher P. Y., Tessier D. (1998)** *Microstructural analysis of highly compacted clay swelling*. 2nd Int. Conf. Unsaturated Soils, Beijing , vol. I, pp.119-124.
- Seed H. B., Woodward R. J. Jr., Lundgren R. (1962)** *Prediction of swelling potential for compacted clays*. Jour. Of Soil Mech. & Found. Div., ASCE, vol. 88, pp. 53-87.
- Sergeyev Y. M., Osipov V. I., Sokolov V. N., Grabowska-Olszewska (1978)** *Types of microstructure of clayey soils*. Proc. 3rd Inter. Cong. Inter. Assoc. of Engineer. Geology, 1, section II, pp. 319-327, Madrid.
- Serratrice J. F., Soyez B. (1996)** *Les essais de gonflement*. Bull. Labo. P. et C. n°204. pp. 65-85.
- Serratrice J. F. (2007)** *Retrait-gonflement des sols argileux et des marnes*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, 107-120
- Sharma R. Y.(1998)** *Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays*. Ph.D thesis, University of Oxford, Keble college, Oxford
- Silvestri V., Sarkis G., Bekkouche N., and Soulié M. (1992)** *Evapotranspiration, trees ad damage to foundations in sensitive clays*. Can. Geotechnical Conf., Vol. II, pp. 533 – 538.
- Sitharam T. G., Sivapullaiah P. V., Subba Rao K. S. (1995)** *Shrinkage behaviour of compacted unsaturated soils*. Proceedings of the 1st Inter. Conf. Unsaturated Soils Unsat'95, Paris, vol. 1, pp. 195-200, Balkema/Presses ENPC
- Snethen D.R. (1984)** *Evaluation of expedient methods for identification and classification of potentially expansive soils*, Proceedings, 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide (1984), pp. 22–26.
- Sridharan A., Choudhury D. (2002)** *Swelling pressure of Sodium montmorillonites*, Géotechnique 52, n° 6, pp. 459-462
- Sridharan A., Rao A. S., Sivapullaiah P. V. (1986)** *Swelling pressure of clays*. Geotech. Testing J., vol. 9 (1), pp. 24-33.
- Sridharan A., Javadeva M. S. (1982)** *Double layer theory and compressibility of clays*. Géotechnique 32, n°. 2, 133-144.
- Sridharan, A. Venkatappa Rao G.(1973)** *Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of effective stress concept*. Géotechnique, 23, pp 359-382

Subba Rao K. S., Satyadas G. G. (1987) *Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage*. 6th Inter. Conf. Expansive soils, New Delhi, pp. 137-142

Sultan N., Delage P., Cui Y. J. (2002) *Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay*. Engineering Geology, 64, pp. 135-145

Suquet H. (1978) *Propriétés de gonflement et structure de la saponite. Comparaison avec la vermiculite*. Thèse Doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

Tanaka H., Locat J. (1999) *A microstructural investigation of Osaka bay clay: the impact of microfossiles on its mechanical behaviour*. Can.Geotech., 36, pp 493-508

Tang C.S., Shi B., Cui Y.J., Tang A.M. (2008) *Effect of Temperature on desiccation cracking behaviour of clayey soils*. Symposium inter. Sécheresse et Constructions, (SEC2008 Magnan, Cojean, Cui et Mestat (éd.)), Vol.1, pp. 115-121.

Taylor R.K., (1988) *Coal measures mudrocks : composition, classification and weathering processes*. Quarterly Journal of Engineering Geology, London, 21, pp. 291-309.

Tessier D. (1984) *Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux : Hydratations, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse de l'université Paris VII, 362p.

Tessier D., Durdaine M., Beaumont A., Jaunet A. (1998) *Swelling pressure and microstructure of an activated swelling clay with temperature*. Clay minerals, vol. 33, pp. 255-267

Tessier D., Blaise F., Coquet Y., Courbet C., Priem J., Lemaire Y., Trillaud S. (2006) *Analyse comparative de politiques de prévention du risque de "sécheresse géotechnique". Modélisation et visualisation du phénomène*. Rapport INRA réalisé pour le compte du MEDD. 287p.

Tourenq C., Tran Ngoc Lan (1989) *Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène – Application aux sols, roches et granulats*. Bull. liaison Labo P. et Ch. N°159, pp 79-92.

Touret O., Pons C. H., Tessier D., Tardy Y. (1990) *Etude de la répartition de l'eau dans des argiles saturées Mg^{+2} aux fortes teneurs en eau*. Clay. Min., 25, pp. 217-233.

Tovey, N.K. (1971) *A selection of scanning electron micrographs of clays*. Cambridge University Engineering Department Technical Report No. CUED/C- SOILS/TR5.

Towner , G.D. (1988) *The influence of sand and silt size particles on the cracking during drying of small clay dominated aggregates*. Journal of soil sciences 39: 347 - 356

Tran Ngoc-Lan (1987) *Gonflement et retrait des argiles. L'eau dans les matériaux*. Journées de Physique LCPC, Les Arcs, vol. 1, pp. 23-28

Tripathy S., Subba Rao K. S., Fredlund D.(2002) *Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils*. Can. Geotech. J., 39, pp 938-959.

Tripathy S., Sridharan A., Schanz T. (2004) *Swelling pressures of compacted bentonites from diffuse double layer theory*. Can. Geotech. J., 41, pp 437-450.

Troalen J. P., Aboushook M., Tisot J.P. (1984) *Utilisation du microscope électronique à balayage en vue de la compréhension des mécanismes du gonflement des sols argileux*, R. Fr. Géotech., n° 29, pp. 75-84

Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. & Pufahl, D.E., (1999) *Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till*. Geotechnique, 49: 2, pp. 143-159.

Van Damme H. (2002) *L'eau et sa représentation*, dans O.Coussy et J. M. Fleureau (dir.), Mécanique des sols non saturés, Lavoisier, Paris, p. 23-68

Van Genuchten, M.TH. (1980) *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society American Journal, Vol. 44, pp. 892 – 898.

Van Olphen H. (1963) *Internal mutual flocculation in clay suspensions*, J. Colloid Sci., 19, pp.313-322.

Van Olphen H. (1976) *Introduction to clay colloid chemistry*. Wiley and Sons, New York, 2nd edition.

Vayssade B. (1978) *Contribution à l'étude du gonflement interparticulaire des sols argileux*. Thèse doctorat ENSMP, Paris, 125 p.

Vijayvergiya V.N. & Ghazzaly O.I. (1973) *Prediction of swelling potential for natural clays*. Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils, vol. 1, Haifa, pp. 227-236.

Villar M. V (1999) *Investigation of the behaviour of bentonite by means of suction-controlled oedometer tests*, Engineering Geology, Vol. 54, Issues 1-2, pp. 67-73

Vincent M. (2003) *Retrait- gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR*. 3^{ème} conférence SIRNAT- Forum des journées pour la Prévention des Risques Naturels, Orléans, janv.2003

Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M., Masrouri F., Oppenheim E., Heck J.-V., Ruaux N. , Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006) *Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport final*. BRGM/RP-54862-FR, 378 p.,308 ill.

Weston D.J. (1980) *Expansive Roadbed Treatment for Southern Africa*. Proceedings, 4th International Conference on Expansive Soils vol. 1 (1980), pp. 339–360.

Weir A.H., et Green-Kelly R. (1962) *Beidellite*. American Mineralogist, n° 47, pp. 137 – 146.

Wilding L. P., Tessier D. (1988) *Genesis of Vertisols: Shrink – Swell Phenomena*. In L.P. Wilding & R. Puentes (ed.) Vertisols: their distribution, properties, classification and management. Tech. Monogr. no.18. Soil Manage. Support. Serv. Texas A&M Univ. Printing Center, College station, TX.

Williams A.B. & Donaldson G.W. (1980) *Developments related to building on expansive soils in South Africa : 1973-1980*. Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, Denver, Vol. 2, pp. 834-844

Williams J. et Shaykewich C.F.(1969) *An evaluation of polyethylene glycol PEG 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matric potential*. Canadian Journal of Soil Science 102 (6), p. 394-398

Xu Y.F., Matsuoka H. & Sun D.A. (2003) *Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures*. Applied Clay Science, vol. 22, pp. 197-209.

Yahia-Aissa M. (1999) *Comportement hydromécanique d'une argile gonflante fortement compactée*. Thèse doctorat ENPC.

Yesiller, N., Miller, C.J., Inci, G. & Yaldo, K. (2000) *Desiccation and cracking of three compacted landfill liner soils*. Engineering Geology 57: 105 - 121

Yevnin A., Zaslavsky D. (1970) *Some factors affecting compacted clay swelling*. Can. Geotech. J., 7, pp. 79-91.

Yilmaz I. (2006) *Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity*. Engineering Geology, n° 85, pp 295-301.

Yong R. N., Warkentin B. P. (1975) *Soil properties and behaviour*. Elsevier

Yong R. N. Mohammed A. D. O. (1992) *A study of particle interaction energies in wetting of unsaturated expansive clays*, Can. Geotech. J., 29: pp.1060-1070.

Yong R. N. (1999a) *Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers*. Engineering Geology, 54, pp 3-13.

Yong R. N. (1999b) *Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance*. Engineering Geology, 54, pp 83-91.

Yong R. N. (1999) *Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance*, Engineering Geology 54, pp. 83-91

Zein A.K.M. (1987) *Comparison of measured and predicted swelling behaviour of a compacted black cotton soil*, 6th Inter. Conf. on expansive soils, New Delhi, pp. 121 – 126

ANNEXE

Etude phénoménologique du retrait-gonflement

Approche bibliographique

SOMMAIRE

1	NATURE ET STRUCTURE DES SOLS ARGILEUX	1
1.1	INTRODUCTION	1
1.2	MINÉRALOGIE DES ARGILES.....	2
1.2.1	<i>Structure des minéraux argileux</i>	2
1.2.1.a	Charge électrique.....	3
1.2.1.b	Liaisons interfeuilletés	3
1.2.2	<i>Les différentes familles de minéraux argileux</i>	4
1.2.2.a	Famille de la kaolinite	4
1.2.2.b	Famille des smectites.....	5
1.2.2.c	Famille de l'illite	6
1.2.2.d	Famille des chlorites.....	6
1.2.2.e	Les interstratifiés	7
1.2.3	<i>Cations échangeables</i>	7
1.2.4	<i>Principales caractéristiques des minéraux argileux</i>	7
2	MICROSTRUCTURES DES SOLS ARGILEUX.....	9
2.1	DEFINITIONS ET CONCEPTS DE TEXTURE/STRUCTURE	9
2.2	CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTES TEXTURES.....	12
2.3	DEFINITIONS DES UNITÉS DE L'ESPACE POREUX.....	15
3	LE SYSTÈME EAU-ARGILE	17
3.1	MECANISMES D'HYDRATATION A L'ÉCHELLE DES PARTICULES ARGILEUSES	17
	<i>Plusieurs phénomènes d'hydratation se présentent à l'échelle des particules argileuses, avec différentes catégories de forces en jeu</i>	17
3.1.1	<i>Hydratation par adsorption</i>	17
3.1.2	<i>Hydratation par capillarité</i>	18
3.1.3	<i>Hydratation par osmose</i>	18
3.1.4	<i>Eau interne et externe</i>	19
3.2	LES FORCES INTERVENANT DANS LE SYSTÈME EAU-ARGILE	19
3.2.1	<i>Forces capillaires</i>	19
3.2.2	<i>Forces de Van der Waals</i>	20
3.2.3	<i>Forces de corrélation ioniques</i>	20
3.2.4	<i>Forces osmotiques</i>	20
3.3	POTENTIEL DE L'EAU INTERSTITIELLE	21
3.4	COURBES DE RETENTION DE L'EAU DANS LE SOL	24
4	LES PROCESSUS DE RETRAIT-GONFLEMENT : ASPECTS PHÉNOMÉNOLOGIQUES.....	28
4.1	MECANISME DU RETRAIT-GONFLEMENT DANS LE SYSTÈME EAU-ARGILE.....	28
4.1.1	<i>Introduction</i>	28
4.1.2	<i>Mécanisme de gonflement</i>	28
4.1.2.a	Gonflement cristallin	29
4.1.2.b	Gonflement Osmotique	29
	Discussion concernant l'application de l'approche de la double couche	33
4.1.2.c	Rôle des cations compensateurs	34
4.1.3	<i>Aspect énergétique du gonflement</i>	35
4.2	DE L'ÉCHELLE MICROSCOPIQUE A L'ÉCHELLE MACROSCOPIQUE	36
4.2.1	<i>Équilibre d'une particule argileuse dans un milieu saturé</i>	36
4.2.2	<i>Équilibre d'une particule argileuse dans un milieu non saturé</i>	37
4.3	GONFLEMENT AU SENS MÉCANIQUE.....	39
	<i>Phénomène de retrait-gonflement des sols argileux dû à la modification de pressions interstitielles négatives (état de succion du sol)</i>	40
4.4	ASPECT PHÉNOMÉNOLOGIQUES DU GONFLEMENT	41
4.4.1	<i>Cinétique de gonflement</i>	41
4.4.2	<i>Évolution de la pression de gonflement</i>	43
4.5	MECANISME DU RETRAIT	45

5	FACTEURS INFLUENÇANT LE RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX.....	49
5.1	FACTEURS MINÉRALOGIQUES ET STRUCTURAUX.....	49
5.2	FACTEURS PHYSIQUE ET PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES.....	50
6	ROLE DU PROCESSUS DE RETRAIT GONFLEMENT SUR L'ÉVOLUTION TEXTURALE/STRUCTURALE DES SOLS.....	58
6.1	PHASE DE DESSICCATION	58
6.2	PHASE D'HUMECTATION	60
6.3	ROLE DES ASPECTS CYCLIQUES DES SOLlicitATIONS HYDRIQUES	63
6.4	FISSURATION	68
6.4.1	<i>Mécanismes en cause</i>	68
	<i>La fissuration du sol est un phénomène observé fréquemment sur les sols naturels et sur les ouvrages en remblai. Elle est due au déséquilibre de l'énergie interne, au sein du sol, causé, par une distribution variable de l'humidité, de la température, ou de l'énergie de compaction (Fang 1994). Ces fissures peuvent apparaître dans les plans de faiblesse préexistants, à l'intérieur des agrégats du sol.</i>	68
7	CARACTÉRISATIONS DIRECTES ET INDIRECTES DE L'APTITUDE DES SOLS ARGILEUX AU RETRAIT-GONFLEMENT.....	73
7.1	PARAMÈTRES DU GONFLEMENT	73
7.2	CARACTÉRISATION AU LABORATOIRE.....	74
7.2.1	<i>Caractérisations indirectes</i>	74
7.2.2	<i>Modèles d'estimation du gonflement - Méthodes indirectes</i>	77
7.2.3	<i>Essais de caractérisation directe du gonflement au laboratoire</i>	78
7.2.3.a	Méthode à gonflement libre (ou méthode d'hydratation sous chargement nul)	78
7.2.3.b	Méthode sous charge constante (Essais en parallèle ou méthodes d'hydratation sous charge constante) 78	
7.2.3.c	Méthode à volume constant (ou méthodes d'hydratation à gonflement empêché).....	79
7.2.4	<i>Étude du retrait au laboratoire</i>	80
8	CARACTÉRISATION HYDRIQUE DES SOLS AU LABORATOIRE - COURBES IMBIBITION- DRAINAGE.....	82
8.1	PAPIER FILTRE	82
8.2	MÉTHODE DE CONTRÔLE OSMOTIQUE	83
8.3	MÉTHODE DE CONTRÔLE PAR PHASE VAPEUR	84
9	CONCLUSION	86

FIGURES

Figure 1.2.1 : Structure d'une couche tétraédrique : a) tétraèdre SiO ₄ ; b) couche tétraédrique.....	2
Figure 1.2.2 : Structure d'une couche octaédrique : a) octaèdre ; b) couche octaédrique	2
Figure 1.2.3 : Association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique.....	3
Figure 1.2.4 : Structures des feuillets de : a) kaolinite, b) smectite (montmorillonite) et c) illite (d'après Michell, 1993).....	4
Figure 1.2.5 : Morphologie des : (a) kaolinites, (b) smectites (cliché pris au MEB (Tovey, 1971).....	6
Figure 2.1.1 : Organisation des particules d'argiles (d'après Yong, 1999a)	10
Figure 2.1.2 : Influence de l'électrolyte sur la porosité d'une bentonite (Wan, 1996, d'après Cui et al, 2002)....	11
Figure 2.2.1 : Arrangement des particules d'argile en suspension (d'après Van Olphen, 1963, modifié par Bultel, 2001).....	12
Figure 2.2.2 : Représentation schématique d'assemblages de particules argileuses et grains non argileux (d'après Collins et Mc Gown, 1974)	13
Figure 2.2.3 : Classification des textures des sols d'origines sédimentaire et éluviale (d'après Sergejev et al, 1978) : texture en nid d'abeille (a), en squelette (b), matricielle (c), fluidale « turbulent » (d), laminaire (e), domaines (f), pseudoglobulaire « pseudoglobular » (g) et en éponge (h).....	14
Figure 2.2.4 : Texture des sols gonflants (d'après Gens & Alonso, 1992).....	14
Figure 2.3.1 : Représentation schématique des différents types de pores (d'après Touret et al., 1990).....	15
Figure 3.1.1 : Interactions eau-argile (d'après Mitchell, 1993)	18
Figure 3.1.2 : Schéma de la double couche selon le modèle de Stern (1924)	19
Figure 3.2.1 : Evolution des pressions résultant des forces d'origine électrostatique (forces de corrélation ionique attractives et forces osmotiques répulsives) entre deux feuillets de montmorillonite, en fonction de la distance de séparation (d'après Van Damme, 2002)	20
Figure 3.3.1 : Remontée capillaire dans un tube (d'après et Delage et Cui, 2000)	22
Figure 3.4.1 : Courbe typique de rétention d'eau de différents types de sols : a) influence de la texture et structure sur la rétention de l'eau dans le sol (d'après Musy et Soutter, 1991) ; b) phénomène d'hystérésis (d'après Delage & Cui, 2000).....	24
Figure 3.4.2 : Effets de l'indice de plasticité sur la rétention d'eau de six sols britanniques (Black ,1962 d'après Delage & Cui 2000).....	25
Figure 3.4.3 : Présentation des propriétés de rétention d'eau et de variation de volume en quatre diagrammes (Biarez et al 1987, d'après Delage et Cui, 2000).....	26
Figure 3.4.4 : Chemin de drainage d'un sol naturel de la région parisienne (d'après Vincent et al., 2006).....	27
Figure 4.1.1 : Gonflement d'une montmorillonite Na avec mise en évidence du gap d'après Norrish (1954).....	30
Figure 4.1.2 : Schéma de la double couche (d'après Bultel, 2001).....	31
Figure 4.2.1 : Forces agissant sur deux particules argileuses (d'après Tran Ngoc Lan, 1987)	36
Figure 4.2.2 : Relation entre $du=2d$ et contrainte effective (d'après Sharma, 1998).....	37
Figure 4.2.3 : Double couche diffuse dans un environnement non saturé (Sharma , 1998).....	38
Figure 4.4.1 : Courbe de gonflement en fonction du temps	41
Figure 4.4.2 : Evolution de la pression de gonflement au cours de l'humidification (Alonso et al. 1999)	43
Figure 4.4.3 : Evolution typique des pressions de gonflement d'une bentonite compactée à différentes densités initiales (Cho et al. 2000)	44
Figure 4.4.4 : Contraintes généralisées observées dans les essais de pression de gonflement (Lloret et al. 2003).	45
Figure 4.5.1 : Représentation schématique de la courbe de retrait d'une argile (d'après Tessier, 1984 ; Coquet, 1995 d'après Tessier et al, 2006).....	46
Figure 4.5.2 : Relation entre le volume des vides et le volume d'eau contenue dans deux argiles (d'après Delage et Cui, 2000).....	47
Figure 5.2.1 : Influence de la densité sèche sur le gonflement (d'après Sridharan, 1986).....	50
Figure 5.2.2 : Influence de la teneur en eau initiale sur la pression de gonflement (d'après El-Sohby & Rabba, 1981).....	51
Figure 5.2.3 : Influence de la teneur en eau initiale sur la pression de gonflement mesurée par la méthode de gonflement libre (γ_d moy = 14,5 kN.m ⁻³) (Guiras-Skandaji, 1996).....	51
Figure 5.2.4 : Évolution du taux de gonflement final en fonction de la teneur en eau initiale pour la bentonite compactée à γ_d moy = 14,5 kN.m ⁻³ (Guiras-Skandaji, 1996).....	52
Figure 5.2.5 : Influence de la densité sèche initiale sur la pression de gonflement a) d'après Komine et Ogata, 1994, et b) d'après Dixon et al. 1996.....	53
Figure 5.2.6 : Influence de la densité sèche initiale et du pourcentage de bentonite sur la pression de gonflement (Xu et al., 2003).....	54

Figure 5.2.7 : Pression de gonflement en fonction de l'indice des vides de l'argile MX-80 (Börgesson et al., 1996).....	54
Figure 5.2.8 : Relation entre le gonflement maximal et la pression verticale (Komine & Ogata 2003)	55
Figure 5.2.9 : Relation entre le gonflement maximal et la densité sèche initiale dans le cas $\sigma_v = 6$ kPa. (Komine & Ogata 2003)	55
Figure 5.2.10 : Relation entre taux de gonflement et succion (d'après Kassif et Ben Shalom, 1971)	56
Figure 6.1.1 : Représentation schématique de l'évolution du volume apparent d'argiles au cours de la première dessiccation en fonction de la succion (depuis $s = 0.01$ bar jusqu'à 1000 bar), (d'après Tessier, 1984).....	60
Figure 6.2.1 : Influence de la succion sur la distance interfoliaire et sur la structure d'une smectite MX80 (d'après Saiyouri et al., 1998).....	61
Figure 6.2.2 : Evolution de la texture du sol au cours du gonflement (d'après Parcevaux, 1980)	62
Figure 6.2.3 : Relation entre taille moyenne des particules et pression ou taux de gonflement (d'après Katti & Shanmugasundaram, 2001)	62
Figure 6.3.1 : Résultats des essais cycliques séchage-humidification sur un sol remanié et compacté ($< 2\mu\text{m} = 51\%$, $I_p = 29\%$, $W_L = 62\%$, $\gamma_d = 16,8 \text{ kN.m}^{-3}$, 30 % montmorillonite, 13 % illite et 51 % kaolinite ; a) séchage partiel, b) séchage complet, d'après Basma et al., 1996)	64
Figure 6.3.2 : Evolution du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement lors des cycles cycliques d'imbibition-séchage sur un sol remanié et compacté ($< 2\mu\text{m} = 51\%$, $I_p = 29\%$, $W_L = 62\%$, $\gamma_d = 16,8 \text{ kN.m}^{-3}$, 30 % montmorillonite, 13 % illite et 51 % kaolinite; (d'après Basma et al., 1996)	64
Figure 6.3.3 : Evolution du potentiel de gonflement lors de sollicitations hydriques cycliques selon différents auteurs (un cycle = imbibition/séchage partiel (a), séchage complet (b)).....	65
Figure 6.3.4 : déformation verticale d'une argile gonflante compactée (argile de Boom), lors de cycles d'humidification/dessiccation réalisés sous différentes charges verticales constantes (d'après Alonso et al, 1999).....	66
Figure 6.3.5 : Changement de l'indice des vides pendant les cycles séchage - humidification des échantillons fortement compactés. (Cui et al. 2002).....	67
Figure 6.3.6 : Evolution de l'indice des vides lors des cycles d'imbibition - séchage (d'après Basma et al, 1996)	68
Figure 6.4.1 : Evolution d'un réseau de fissures entre le début (a) et la fin (b) du dessèchement (Hallaire, 1988)	70
Figure 6.4.2 : Fissuration lors de la dessiccation de l'Argile intacte de Saint-Alban ; a) après 23 h de dessiccation, b) après 182 h de dessiccation, c) formation de protubérances sous les polygones après 2 h de dessiccation (d'après Konrad et Ayad, 1997).....	70
Figure 6.4.3 : Mécanisme intervenant lors de dessiccation de Argile de Saint-Alban (Konrad et Ayad, 1997)...	71
Figure 7.2.1 : a) Caractérisation des sols gonflants (d'après Vijayvergiya et Ghazzaly, 1973 dans Parcevaux, 1980) ; b) Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al., 1962)	75
Figure 7.2.2 : Classification des sols gonflants (d'après Mc Keen, 1992)	76
Figure 7.2.3 : Différentes méthodes d'essais de gonflement (d'après Sridharan et al., 1986)	79
Figure 7.2.4 : a) Principe de l'essai de retrait linéaire (Phlipponnat, 1991) ; b) Détermination de la limite de retrait effective (d'après Bigot et Zerhouni, 2000) c) Influence de la taille des échantillons sur la pente de retrait (d'après Tessier et al, 2006)	81
Figure 8.1.1 : Courbe d'étalonnage du papier-filtre Whatman n° 42 sec et humide (d'après Delage & Cui, 2000)	83
Figure 8.2.1 : a) Relation entre succion et concentration de PEG ; b) Mise en œuvre de la technique osmotique (Delage & Cui, 2000)	84
Figure 8.3.1 : Contrôle de succion par phase vapeur (Delage & Cui, 2000).....	85

TABLEAUX

Tableau 1.2.1 : Classification des phyllosilicates (d'après Caillère et Hénin, 1963 ; complété par Besson et al, 1990 et Mitchell, 1993)	5
Tableau 1.2.2 : Caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux	8
Tableau 6.1.1 : Evolution du nombre de feuillets par particule lors de la dessiccation et de la réhumectation de smectite calcique de Wyoming (10^{-3}) (Ben Rah̄em et al., 1987)	59
Tableau 7.2.1 : Classification du potentiel de gonflement des sols argileux selon différents auteurs	74
Tableau 7.2.2 : Paramètres hydriques et potentiel de gonflement (d'après Mc Keen, 1992)	76
Tableau 7.2.3 : Modèles d'estimation du taux de gonflement (ϵ_g) et de la pression de gonflement (σ_g)	77
Tableau 7.2.1 : Méthodes de mesure ou d'imposition de la succion (d'après Ridley et Wray, 1995, modifié)	82
Tableau 8.3.1 : Relation humidité relative - succion (Delage & Cui 2000)	85

1 Nature et structure des sols argileux

1.1 Introduction

Le terme argile est assez imprécis, il en existe plusieurs définitions. Pour un géotechnicien ou un mécanicien des sols, un sol argileux est un matériau meuble ou déformable dont une proportion importante des éléments a une taille inférieure à 2 μm . Ces éléments sont constitués de minéraux argileux mais aussi d'autres minéraux non argileux (quartz, carbonates, feldspaths, etc...). La nature et la proportion des minéraux argileux sont en grande partie responsables des caractéristiques géotechniques, du comportement hydrique et mécanique du matériau (plasticité, compressibilité, phénomène de retrait-gonflement). La définition que nous retiendrons par la suite est celle des minéralogistes qui définissent les argiles comme des minéraux phylliteux ou fibreux dont la taille n'excède pas quelques μm .

La plupart des sols sont susceptibles de gonfler ou de s'effondrer lors d'une imbibition, ce processus dépend de l'intensité des contraintes appliquées au sol et de l'historique de ces contraintes. Ainsi, comme l'a souligné Sharma (1998) une classification trop rigide des sols gonflants et des sols effondrables peut induire en erreur.

Cependant, au cours de l'imbibition, l'amplitude de gonflement peut changer considérablement d'un sol à l'autre. Ainsi, un fort potentiel de gonflement est principalement attribué à la présence, dans le sol, de minéraux argileux gonflants tels que la montmorillonite. La compréhension des interactions physico-chimiques existant entre l'eau et l'argile du sol permet d'expliquer son comportement.

Les facteurs entrant en jeu dans la variation de la sensibilité au phénomène de retrait-gonflement des sols sont d'une part la nature et la proportion des *minéraux argileux*, d'autre part l'arrangement ou *texture* de l'ensemble des minéraux entrant dans la composition du sol. Dans ce contexte, l'objectif principal de ce chapitre est de réaliser une synthèse bibliographique sur ces facteurs de prédisposition au retrait-gonflement et d'exposer les différents critères chimiques, physiques, hydriques, mécaniques jouant un rôle déterminant dans les processus de retrait-gonflement.

Dans la première partie de ce chapitre, après avoir défini les argiles au sens minéralogique et énoncé les propriétés du système eau / particules argileuses, une synthèse de l'ensemble des caractéristiques des « sols argileux » sera présentée. Ensuite, les aspects phénoménologiques des processus de retrait-gonflement seront analysés, prenant en considération les différentes origines : physico-chimique et mécanique, et précisant les facteurs extérieurs susceptibles d'influencer ces processus. Nous insisterons sur les conséquences de sollicitations hydriques uniques ou cycliques, sur l'évolution de la microstructure, ainsi que sur la propagation de la fissuration, à la fois sur des matériaux naturels et sur des matériaux reconstitués. Pour terminer ce chapitre, les méthodes de caractérisations directes et indirectes de l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement, aussi bien au laboratoire qu'in situ, par des mesures de paramètres géotechniques, hydriques et mécaniques, seront exposées.

1.2 Minéralogie des argiles

1.2.1 Structure des minéraux argileux

En minéralogie, le terme argile désigne un groupe de minéraux appartenant à la famille des aluminosilicates plus au moins hydratés, de taille généralement inférieure à 2 μm et avec une texture phylliteuse ou fibreuse. Les minéraux argileux appartiennent à la famille des phyllosilicates. Les phyllosilicates sont formés de particules dont les unités de base sont des feuillets bidimensionnels, formés à partir de deux unités structurales de base : le tétraèdre de silicium et l'octaèdre d'aluminium ou de magnésium.

Le tétraèdre, de formule générale SiO_4^{4-} , est composé d'un atome de silicium contenu dans le vide, de taille 0.55 Å (Mitchell, 1993), formé par 4 atomes d'oxygène. Ce cation peut être substitué par un cation Al^{3+} . Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques (Figure 1.2.1)

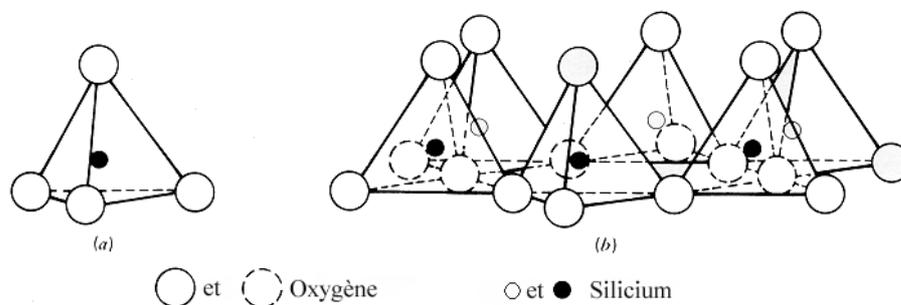


Figure 1.2.1 : Structure d'une couche tétraédrique : a) tétraèdre SiO_4 ; b) couche tétraédrique

L'octaèdre, de formule générale $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ou $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ est formé de 6 ions hydroxyles ou 6 oxygènes disposés en assemblage hexagonal compact. Les six anions O^{2-} ou $(\text{OH})^-$, disposés aux sommets de chaque octaèdre, enserrant, au centre de l'octaèdre, un cation tel que Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} ou Fe^{2+} . (Mitchell, 1993). Ces octaèdres se combinent également de façon à former des couches octaédriques (Figure 1.2.2). Lorsque les cavités octaédriques sont toutes occupées par des cations métalliques bivalents (Mg^{2+}) la structure est appelée trioctaédrique ; lorsque deux tiers des cavités octaédriques sont occupés par des cations métalliques trivalents (Al^{3+} , Fe^{3+}), la structure est alors appelée dioctaédrique.

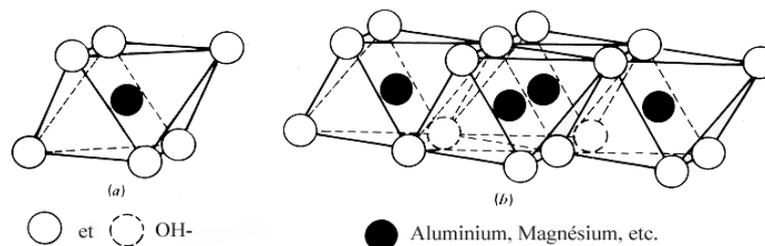


Figure 1.2.2 : Structure d'une couche octaédrique : a) octaèdre ; b) couche octaédrique

Un feuillet élémentaire est constitué par l'ensemble de 2 ou 3 couches tétraédriques et octaédriques et les feuillets s'empilent pour former la particule argileuse. La couche

tétraédrique et la couche octaédrique sont interdépendantes dans la mesure où les atomes d'oxygène, représentant la pointe inférieure des tétraèdres, appartiennent aussi au plan des atomes constituant la partie supérieure de la couche octaédrique

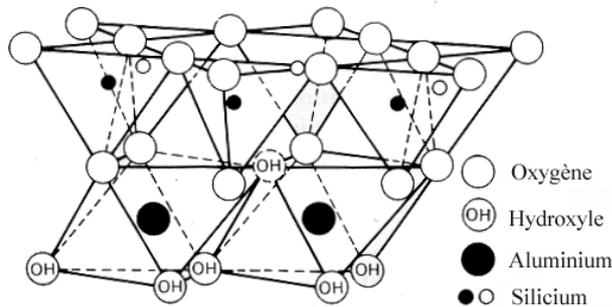


Figure 1.2.3 : Association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique

1.2.1.a Charge électrique

Les feuillets ne sont pas électriquement neutres. Une nette charge négative à la surface du feuillet (Sharma, 1998) résulte de la distribution des cations à l'intérieur du feuillet, et de celle des anions (oxygènes et hydroxyles) à l'extérieur. Des substitutions isomorphes peuvent aussi exister au sein des unités structurales de base : les substitutions les plus courantes sont Si^{4+} remplacé par Al^{3+} ou Fe^{3+} , Al^{3+} remplacé par Mg^{2+} . Elles induisent alors, un déficit de charge positive qui augmente d'autant la charge négative globale du feuillet.

Par ailleurs, il peut exister aussi des charges positives de bordure qui apparaissent lorsqu'un cristal se rompt (Sharma, 1998). Un feuillet peut donc être schématisé comme un objet chargé négativement sur la surface et positivement sur les bords.

1.2.1.b Liaisons interfeuillets

Les forces de liaisons entre feuillets sont principalement dues aux :

- *forces d'attraction moléculaire de Van der Waals* qui donnent des liaisons faibles ;
- *liaisons hydrogènes* qui se forment en présence d'atomes fortement électronégatifs (exemple de l'oxygène dans le cas des argiles) ;
- *substitutions isomorphes* qui résultent du remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de valence différente.

Les particules argileuses sont donc soumises à un ensemble de forces d'attraction et de répulsion qui varient avec la teneur en eau et dépendent des substitutions isomorphes.

Les types d'assemblage des couches tétraédriques et octaédriques permettent de définir différents feuillets élémentaires de phyllosilicates. La structure formée en liant une couche octaédrique à une couche tétraédrique (feuillet de type kaolinite) est appelée : feuillet 1:1 ou TO et son épaisseur est d'environ 0.7nm.

Lorsqu'une couche octaédrique est comprise entre deux couches tétraédriques, le feuillet est appelée 2:1 ou TOT et son épaisseur est d'environ 0,9nm (Van Damme, 2002). Les feuillets de type mica ou illite en sont un exemple.

Les feuillets de type chlorite sont constitués par un feuillet TOT, sur lequel vient se placer une couche octaédrique libre (épaisseur du feuillet : 14 Å).

1.2.2 Les différentes familles de minéraux argileux

En se basant sur le type de feuillet, sa charge et la nature des espaces interfoliaires il est possible d'identifier différentes familles de minéraux argileux qui présentent des caractéristiques structurales, morphologiques et colloïdales spécifiques (Brindley, 1951, Caillère et Hénin, 1956) (Tableau 1.2.1).

Les sols argileux sont un mélange complexe de différents minéraux, les minéraux argileux les plus représentés étant les illites, les kaolinites, les smectites de type montmorillonite et les interstratifiés. Une description des principales familles de minéraux argileux est présentée dans les paragraphes suivants.

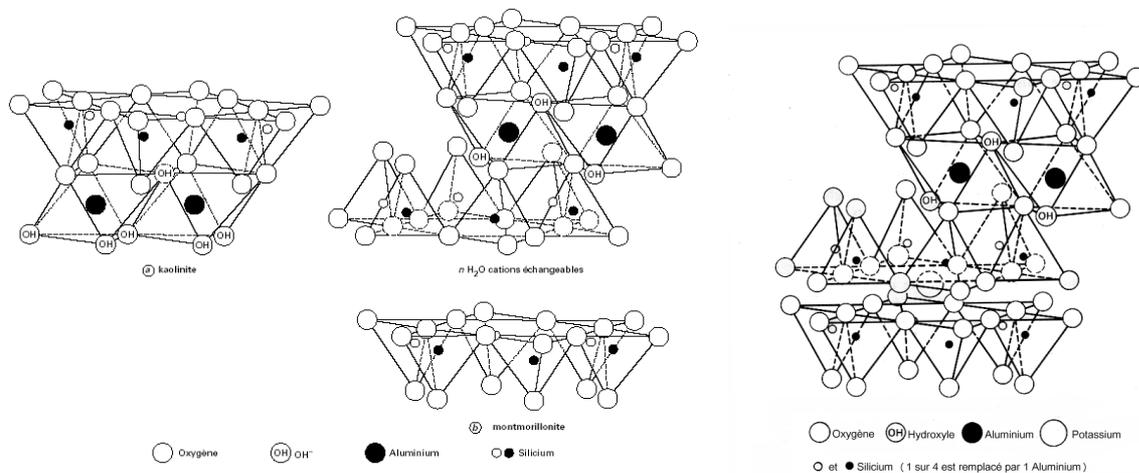


Figure 1.2.4 : Structures des feuillets de : a) kaolinite, b) smectite (montmorillonite) et c) illite (d'après Michell, 1993)

1.2.2.a Famille de la kaolinite

La kaolinite fait partie de la famille TO ou 1:1 (Figure 1.2.4 a, Figure 1.2.5 a). Chaque feuillet est constitué d'une couche de tétraèdres SiO_4^{4-} et d'une couche d'octaèdres Al hexacoordonnés. Les feuillets s'empilent en étant liés les uns aux autres par des liaisons hydrogènes et des forces de van der Waals. Les cristallites (association de plusieurs feuillets, Tessier, 1984) qui résultent de cet empilement sont des plaquettes rigides, dont l'extension latérale est de quelques centaines de nm et l'épaisseur de quelques dizaines de nm (Van Damme, 2002). Les fortes liaisons interfeuillets s'opposent à la pénétration de l'eau dans l'espace interfoliaire.

Tableau 1.2.1 : Classification des phyllosilicates (d'après Caillère et Hénin, 1963 ; complété par Besson et al, 1990 et Mitchell, 1993)

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Charge /maille élémentaire	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 / 1	Pas de cations ou seulement H ₂ O	x = 0	Kaolinites	Dioctaédrique	kaolinite, dickite, nacrite, halloysite
			Serpentines	Trioctaédrique	chrysotile, antigorite, lizardite
2 / 1	Pas de cations	x = 0	Pyrophyllites	Dioctaédrique	pyrophyllite
			Talc	Trioctaédrique	talc
	Cations hydratés et échangeables	x = 0.2 à 0.6	Smectites	Dioctaédrique	montmorillonite, beidellite, nontronite
				Trioctaédrique	saponite, hectorite, sauconite
	Cations monovalents non hydratés	x = 0.6 à 1.0	Micas	Dioctaédrique	muscovite, illite, paragonite
				Trioctaédrique	phlogopite, biotite, lepidolite
	Cations divalents non-hydratés	x = 1.8 à 2.0	Micas durs	Dioctaédrique	margarite
				Trioctaédrique	clintonite
Hydroxyles	x variable	Chlorites	Dioctaédrique	donbassite	
			Di-trioctaédrique	cookeite, sudoïte	
				Trioctaédrique	clinochlore, chamosite, nimite
2 / 1 fibreux		x variable	Palygorskites		palygorskite
			Sépiolites		sépiolite

1.2.2.b Famille des smectites

Les smectites sont composées de trois couches, une couche octaédrique entourée par deux couches tétraédriques. Elles appartiennent à la famille d'argiles T-O-T ou 2:1 (Figure 1.2.4 b, Figure 1.2.5 b). L'épaisseur du feuillet est de l'ordre de 10Å. Il existe des substitutions isomorphiques dans la couche tétraédrique (Si⁴⁺ par Al³⁺) et/ou dans la couche octaédrique (Al³⁺ par Mg²⁺, Mg²⁺ par Li⁺). Ces substitutions conduisent à un déficit de charge (de l'ordre de 0,7 charge par maille, Van Damme, 2002) qui est comblé dans l'espace interfoliaire par des cations compensateurs hydratés tel que Na⁺, Ca²⁺, etc... Ces cations sont reliés aux feuillets par des liaisons de faible énergie de type Van Der Waals. Elles permettent aux molécules d'eau, attirées par les cations compensateurs dont l'énergie d'hydratation est importante, de se fixer dans l'espace interfoliaire. L'épaisseur du feuillet varie entre 12 et 15Å selon la nature et l'hydratation du cation interfoliaire.

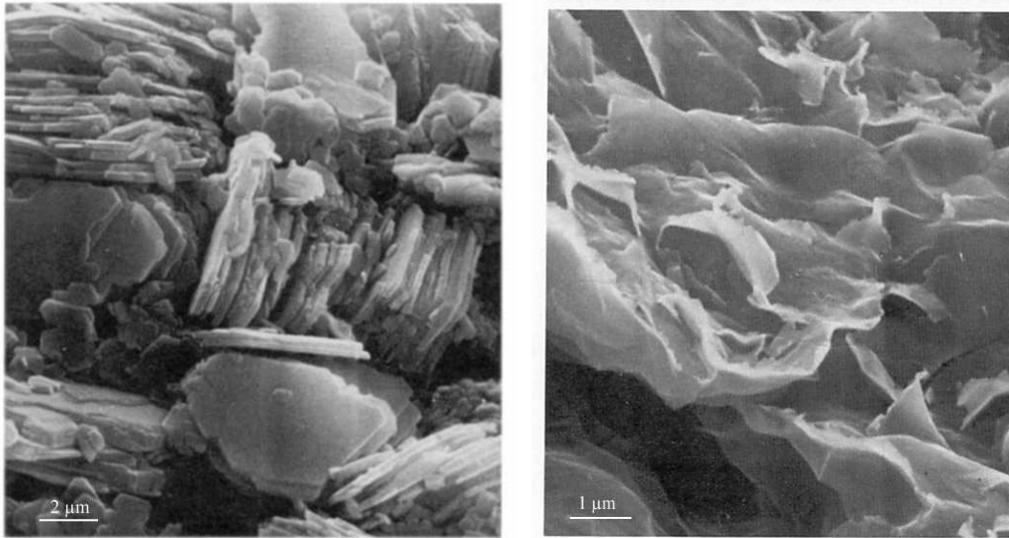


Figure 1.2.5 : Morphologie des : (a) kaolinites, (b) smectites (cliché pris au MEB (Tovey, 1971))

Les feuillets de smectites ont une extension latérale extrêmement grande (1μm) par rapport à leur épaisseur et sont flexibles, même si cette flexibilité diminue lorsqu'ils sont accolés à des cations interfoliaires hydratés (Van Damme, 2002). La famille des smectites dont la montmorillonite est la plus fréquente constitue la catégorie des argiles gonflantes.

1.2.2.c Famille de l'illite

La structure de l'illite est proche de celle des smectites mais elles présentent un déficit de charge dû aux substitutions plus élevées (1,6 charge par maille, Van Damme, 2002) et les cations interfoliaires sont tous des K^+ . Les cations K^+ ont la particularité de posséder exactement la dimension des cavités de surface du feuillet où ils sont piégés et fournissent ainsi les liaisons entre les feuillets. Cette liaison des feuillets, par le potassium anhydre, est si forte que les molécules d'eau ne parviennent pas à s'engager entre les feuillets. Ceci rend les cations K^+ non hydratés et non échangeables (Tessier 1984).

Les feuillets de l'illite s'empilent donc, solidement liés les uns aux autres, pour former des cristallites en forme de plaquette (particule) qui ne sont pas expansibles dans l'eau. La particule d'illite comporte, par exemple, une dizaine de feuillets pour une épaisseur de quelques centièmes de micromètres.

1.2.2.d Famille des chlorites

La famille des chlorites a une structure de type TOT-O. Initialement il s'agit d'une structure TOT dont l'espace interfoliaire est totalement occupé par des Mg^{2+} , cependant les hydroxyles interfeuillets des feuillets élémentaires TOT arrivent à se réunir latéralement pour former avec ce cation une couche octaédrique supplémentaire, donnant naissance à un assemblage de type TOT-O très stable, d'épaisseur 14 Å.

1.2.2.e Les interstratifiés

Les argiles interstratifiées résultent de l'empilement de feuillets ou de paquets de feuillets appartenant à des familles différentes. Par exemple, des argiles interstratifiées de type illite-smectite sont fréquentes dans les sols naturels.

1.2.3 Cations échangeables

Les substitutions isomorphes de Si^{4+} par Al^{3+} ou Fe^{3+} , Al^{3+} par Mg^{2+} à la surface des feuillets entraînent un déficit de charge positive. L'électroneutralité est alors préservée par la fixation ou l'adsorption d'autres cations (comme Ca^{2+} ou Na^+) et/ou de molécules polaires dans l'espace interfoliaire. Ces cations fixés à la surface des argiles sont appelés « *cations échangeables* ». Par exemple, les montmorillonites dont l'électroneutralité est assurée par des cations Ca^{2+} sont appelées des montmorillonites calciques, et lorsqu'elle est assurée par des cations Na^+ , ce sont des montmorillonites sodiques. Le type de cation échangeable influence le gonflement induit lors du mouillage et la texture des argiles

Les cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux. L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodium Na^+ étant plus faible que celle des cations de calcium Ca^{2+} , aura pour conséquence une plus grande surface spécifique de la montmorillonite sodique propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets.

1.2.4 Principales caractéristiques des minéraux argileux

Le comportement de ces différentes argiles est conditionné d'une part, par leurs propriétés intrinsèques telles que la localisation et la densité de charge, la taille et la surface spécifique des particules, le type et la charge des cations compensateurs; et d'autre part, par les conditions environnantes telles que le type et la concentration de l'électrolyte, la température, etc...(Tessier, 1984; Qi, 1996; Durand et al, 1995; Van Damme, 2002). Le Tableau 1.2.2 donne quelques unes des propriétés des ces différents types d'argiles.

La capacité d'échange cationique (CEC) mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est définie comme étant le nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs d'un silicate pour compenser la charge électrique de 100g de ce minéral calciné, soit la capacité d'échange qui est liée à la charge négative du feuillet.

La *surface spécifique* des argiles est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. La forme des particules argileuses leur confère une grande surface spécifique, beaucoup plus importante que tous les autres minéraux (Tableau 1.2.2), donc une capacité d'adsorption des molécules d'eau et des ions très élevée (Komornik et David, 1969). Autrement dit, l'augmentation de la surface spécifique entraîne la diminution de la densité en charge, et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. Les argiles, dont la surface spécifique est élevée, sont très gonflantes. La présence de minéraux non argileux dans un sol entraîne une « dilution » des minéraux argileux et de ce fait la surface spécifique totale développée, est inférieure à celle de l'argile pure.

Tableau 1.2.2 : Caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux

	kaolinite	illite	smectite	source
Charge (meq/100g)	5 - 15	20 - 40	80 - 100	Yong et Warkentin, 1975
Surface spécifique (m ² .g ⁻¹)	10 - 20	65 - 100	700 - 840	Mitchell, 1993
CEC (meq/100g)	3 - 15	10 - 40	80 - 150	Mitchell, 1993
Diamètre d'une particule (µm)	0,1 - 10	0,1 - 1	0,1	Bultel, 2001
Epaisseur d'une particule (µm)	1 - 10	0,003 - 0,01	0,001	Bultel, 2001
Masse volumique	2,60 - 2,68	2,60 - 3,00	2,35 - 2,70	Mitchell, 1993
Limite de liquidité (%)	30 - 75	60 - 90	100 - 1000	Giroud et Bottero, 1972
Limite de Plasticité (%)	20 - 40	25 - 60	50 - 100	Giroud et Bottero, 1972
Activité	0,01 - 0,4	0,25 - 0,9	0,57 - 7	Giroud et Bottero, 1972

2 Microstructures des sols argileux

Les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols argileux sont contrôlées à la fois par leur minéralogie, leurs propriétés physico-chimiques telles que les interactions eau-solide, et l'arrangement microstructural.

La microstructure des sols argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Un sol argileux qui présente une organisation des particules d'argiles serrée et orientée, n'a pas la même aptitude au gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation rapide et récente est responsable d'une distance maximale entre les plaquettes. Cette organisation des minéraux argileux est une des principales causes du gonflement anisotrope.

L'objectif de cette partie est d'exposer les différents types de texture des sols argileux et les différentes terminologies utilisées pour les décrire.

2.1 Définitions et concepts de texture/structure

En pédologie la texture est liée à la granulométrie, alors que la structure désigne d'une part l'assemblage de plusieurs minéraux sous forme d'agrégats et d'autre part l'arrangement spatial de ces unités (Audiguier, 1979). En géologie la texture regroupe les deux notions précédentes. Elle désigne « la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche » (Brousse, 1968).

Par contre, dans la littérature anglo-saxonne les mots « fabric » et « structure » sont couramment employés et se réfèrent en générale aux arrangements de particules et/ou des associations de particules et de l'espace poreux dans les sols (Mitchell, 1993). Le terme « microfabric » est utilisé pour désigner l'association des particules élémentaires au sein des agrégats et le terme « macrofabric » pour l'arrangement des agrégats entre eux (Mitchell, 1976). Cependant, dans les publications récentes les mots « micro- et macrostructure » sont largement utilisés à la place des mots respectivement micro- et macrofabric. Par la suite, nous utiliserons indifféremment le mot texture avec le sens donné par Brousse (1968) et le mot structure au sens anglo-saxon qui tend à être généralisé.

Le développement de méthodes telles que la diffraction de rayons X, le MET, le MEB, le BET, et la porosimétrie par injection de mercure, a permis de caractériser de façon qualitative et quantitative l'arrangement textural des matériaux argileux. On citera entre autres, les travaux de recherche de van Olphen (1963), Gillott (1970), Diamond (1970), Le Roux (1972, 1975), Collins et McGown (1974), McConnachie (1974), Yong et Warkentin (1975), Sergeev et al. (1978), Osipov et Sokolov (1978), Delage (1979), Parcevaux (1980), Arnould et al (1980), Camara (1982), Tessier (1984), Delage et Lefebvre (1984), Audiguier & Delage (1987), Griffiths et Joshi (1990), Al-Mukthar (1995, 1996), Qi (1996), Tanaka et Locat (1999), Al-Rawas et McGown (1999), Abudullah et al. (1999), Katti et Shanmugasudarama (2001), Guillot (2002), Montes (2002). La plupart de ces auteurs ont remarqué que la texture des sols argileux est influencée par différents facteurs tels que la taille des particules, la capacité d'échange cationique, le type de cation, la nature et la concentration d'électrolyte, l'acidité, la température, la matière organique, les forces d'interaction entre particules, l'histoire des contraintes (mécaniques ou hydriques) subies par le matériau, les cycles

d'humectation et de dessiccation, la genèse et l'évolution diagénétique d'un sédiment, et l'évolution pédologique.

L'observation des sols argileux au Microscope Electronique à Balayage a permis de décrire l'arrangement des particules argileuses et de caractériser certaines textures types. Les sols argileux naturels, en leur grande majorité, sont un mélange de particules de nature et de taille différentes. Elles sont le plus souvent agrégées et présentent des associations de constituants de taille croissante, emboîtées les unes dans les autres (Arnould et al, 1980; Delage & Lefebvre, 1984). Les différents travaux concernant l'étude de ces associations, font appel à un vocabulaire spécifique à chaque spécialité concernée (physico-chimie, géologie, pédologie, pétro-physique).

D'après Tessier (1984), la constitution des argiles comprend plusieurs niveaux superposés :

- les feuillets ;
- la particule primaire (ou le cristallite élémentaire) qui est un empilement de feuillets ;
- l'unité morphologique, plus petite unité stable, qui peut être le cristallite élémentaire isolé (cas de la kaolinite) composé de feuillets sous la forme de plaquettes, le microdomaine (cas des illites) composé d'agrégats de cristallites, eux même composés de 5 à 7 feuillets anhydres, et le quasi-cristal (cas des smectites) formé par l'accollage face à face des feuillets de smectites ;
- l'association des unités morphologiques : soit bord - face, caractérisée par une porosité importante et une isotropie marquée, soit face-face, caractérisée par une faible porosité et une forte anisotropie.

Pour Yong (1975, 1999 a et b), la hiérarchie d'organisation des argiles se présente de la façon suivante : feuillets < particules < domaines ou tactoïdes < "cluster" < "ped" (Figure 2.1.1). Selon lui les « peds » représentent l'unité constitutive des argiles observables à l'œil nu (macroscopique) formée par une association de "clusters" de taille microscopique. Alors que, les domaines et les tactoïdes sont ultra-microscopiques (observables en microscopie électronique) et composés de deux ou trois particules.

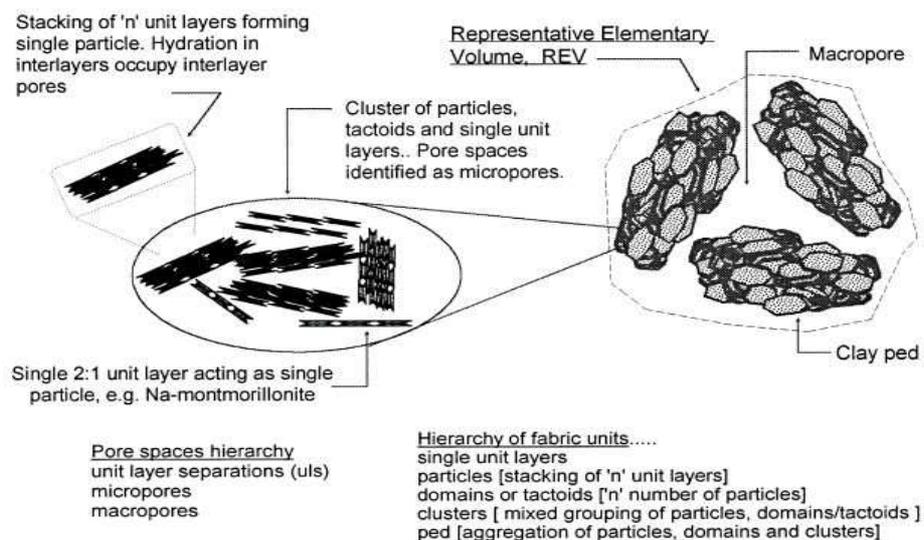


Figure 2.1.1 : Organisation des particules d'argiles (d'après Yong, 1999a)

C'est donc l'organisation de ces diverses unités en association avec des éléments non argileux qui définit la texture d'un sol argileux. Les forces répulsives et attractives entre particules jouent un rôle capital dans l'organisation de ces diverses unités constitutives et de ce fait dans la texture des sols argileux. D'après Young et Warkentin (1975), une diminution des forces de répulsion peut entraîner la floculation des particules argileuses, c'est le cas des sols gonflants en présence d'une concentration élevée en sel.

Abudullah et al (1999) ont remarqué que dans le cas d'un sol compacté, pour une teneur en eau supérieure à celle de l'optimum proctor, un pH élevé, une faible concentration en cations échangeables, dont un pourcentage plus élevé de cations monovalents, favorise une texture dispersée ou orientée. Ces mêmes auteurs, travaillant sur une argile ($W_L = 107\%$, $I_p = 55\%$) saturée par différents cations (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}), ont montré que l'association des particules diffère en fonction du cation de saturation, ceci ayant pour conséquence une modification des propriétés géotechniques du sol (limite d'Atterberg, compaction, potentiel de gonflement,...).

Par ailleurs, les résultats d'essais porosimétriques (Wan, 1996, d'après Cui et al, 2002), effectués sur trois types de mélange bentonitique compacté à la même densité sèche de $12,5 \text{ kNm}^{-3}$: un mélange sable-bentonite (50-50 % en poids), une bentonite sodique et une bentonite calcique, ont montré que le spectre de la taille des pores dépend de la nature des cations présents dans la solution : Na^+ favorise une répartition unimodale des accès de pores vers les faibles rayons 1 nm alors que Ca^{2+} favorise la formation d'agrégats se traduisant par une répartition bimodale (une famille dont la taille est identique à la précédente et une famille vers $50 \mu\text{m}$ correspondant à la porosité interagrégat) (Figure 2.1.2).

La texture du sol dépend donc des interactions eau-argile à tous les niveaux d'organisation, de la particule élémentaire à l'agrégat (Tessier, 1984).

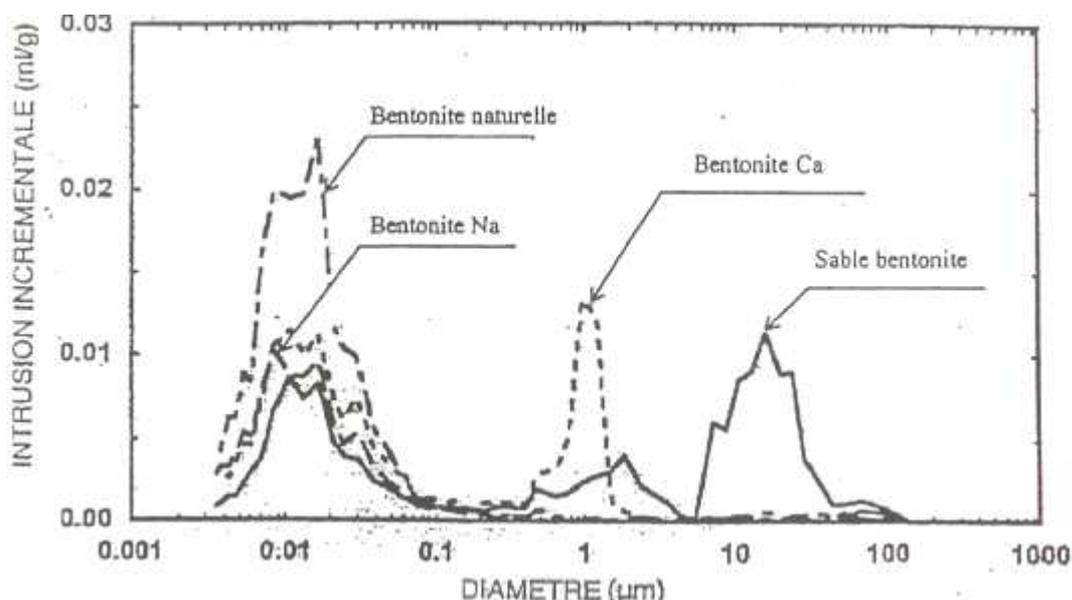


Figure 2.1.2 : Influence de l'électrolyte sur la porosité d'une bentonite (Wan, 1996, d'après Cui et al, 2002)

2.2 Classification des différentes textures

A partir des unités constitutives, différentes classifications de la texture des sols ont été proposées.

Ainsi Van Olphen (1963) a proposé une classification basée sur l'association des particules argileuses en suspension. Cette classification ne repose pas sur une observation directe, mais sur des possibilités d'assemblages géométriques. Le modèle suppose que, dans les suspensions d'argile, trois modes d'associations, liés aux charges de surface et de bord des feuillettes d'argiles, peuvent être considérés : bord-face (B-F), bord-bord (B-B) et face-face (F-F) (Figure 2.2.1).

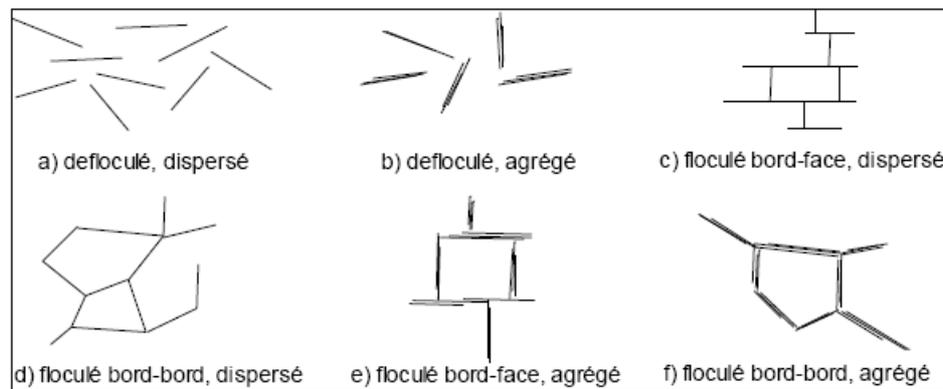


Figure 2.2.1 : Arrangement des particules d'argile en suspension (d'après Van Olphen, 1963, modifié par Bultel, 2001)

Collins et McGown (1974), travaillant sur des sols naturels et utilisant le MEB, ont tenté de compléter la schématisation de Van Olphen dans le cas de sols contenant une proportion non négligeable de grains non argileux. Ils ont introduit dans leur classification les relations existant entre particules argileuses et grains sableux ou silteux (Figure 2.2.2) : connexions argileuses entre grains silteux (a, b, c), agrégats irréguliers en nid d'abeille (d, e), agrégats réguliers (f, g), particules argileuses entrelacées avec ou sans inclusion silteuse (h, j), matrice argileuse (k) ou matrice granulaire (l).

Le Roux (1975) distingue, à partir de l'observation d'une marne au Microscope Electronique à Balayage trois classes principales de textures :

- une *texture homogène* où tous les minéraux sont intimement mélangés et où aucune direction n'est privilégiée, avec des sous-classes : *homogène à dominante argileuse* ou à *dominante carbonatée*, et *homogène compacte ou lâche* suivant la compacité et la continuité ;
- une *texture orientée* où une direction privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains, en particulier des phyllites ;
- une *texture floconneuse* ou en *microagrégats* où la phase argileuse se présente sous forme de flocons grossièrement sphériques, soit seule, soit associée aux carbonates. Lorsque la dimension des flocons devient importante de l'ordre de 100 μm on passe à une texture en microagrégats.

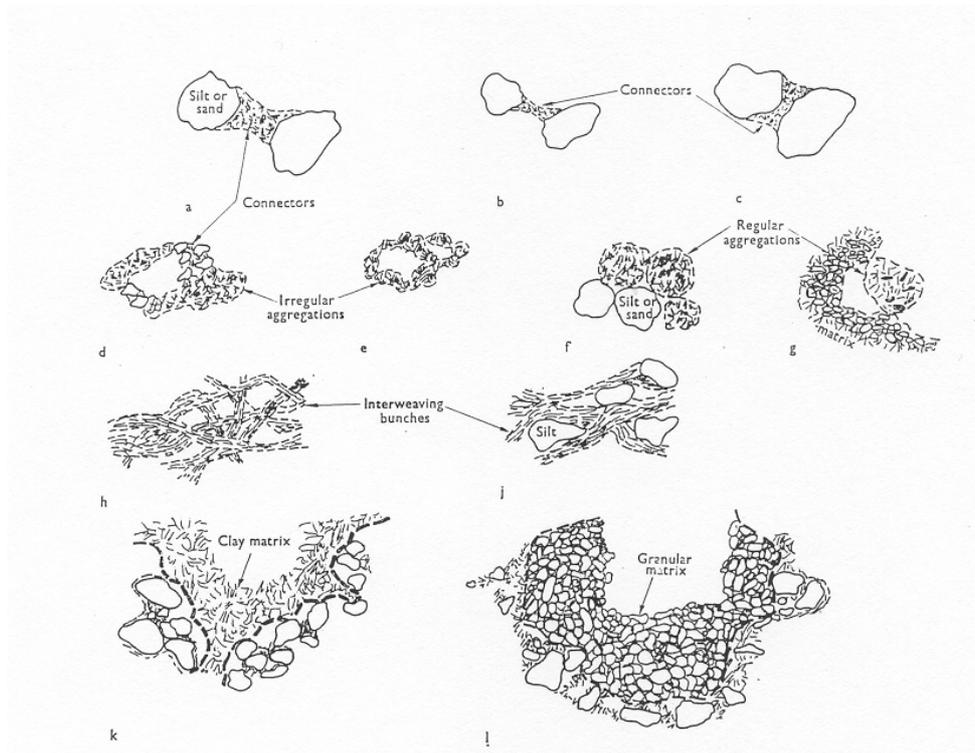


Figure 2.2.2 : Représentation schématique d'assemblages de particules argileuses et grains non argileux (d'après Collins et Mc Gown, 1974)

Sergeyev et al. (1978), à partir d'observations au MEB d'un très grand nombre de sols différents, ont établi une classification de la texture des sols argileux en relation avec leur formation et leur degré de compaction (Figure 2.2.3). Ils ont défini ainsi cinq types de textures pour les sols d'origine sédimentaire :

- *en nid d'abeille* : prédominant dans les dépôts d'origine marine et lacustre récents et n'ayant pas subi de forte compaction ;
- *en squelette* : prédominant dans les dépôts glaciaires ne contenant que peu d'argile ;
- *matricielle* : prédominant dans les dépôts alluviaux et glaciaires peu compactés ;
- *fluidale* : prédominant dans les dépôts alluviaux fortement compactés ;
- *laminaire* : prédominant dans les dépôts glacio-lacustres.

Ils ont aussi défini trois types de textures pour les sols d'origine éluviale :

- *en domaines* : prédominant dans les kaolinites provenant de l'altération des granites ;
- *pseudoglobulaire et en éponge* : prédominant dans les montmorillonites et nontronites provenant des serpentines.

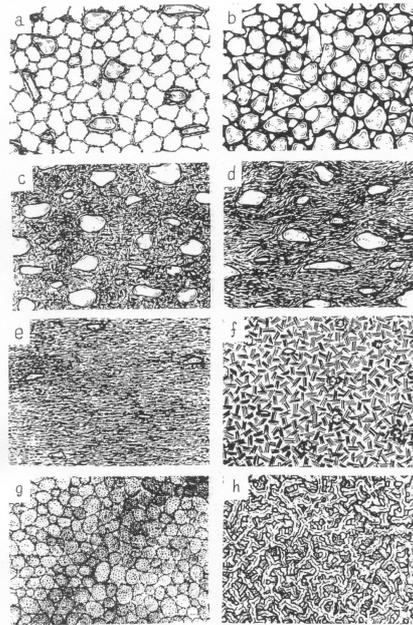


Figure 2.2.3 : Classification des textures des sols d'origines sédimentaire et éluviale (d'après Sergeyev et al, 1978) : texture en nid d'abeille (a), en squelette (b), matricielle (c), fluidale « turbulent » (d), laminaire (e), domaines (f), pseudoglobulaire « pseudoglobular » (g) et en éponge (h)

Gens et Alonso (1992), se basant en particulier sur les travaux de Collins et MacGown (1974), ont proposé un schéma de texture pour les sols gonflants (Figure 2.2.4). Selon ces auteurs les particules élémentaires sont composées de quelques feuillets sous la forme de plaquettes et leur assemblage donne des mottes ou des agrégats. Si la texture est dominée par l'arrangement des particules élémentaires on aura une texture « matricielle », et si elle est composée par des mottes en forme de grains on aura une texture « agrégée ». La première texture est typique des sols compactés côte humide de l'optimum Proctor, et la deuxième est représentative de la majorité des sols naturels ou compactés côté sec de l'optimum Proctor. Trois niveaux texturaux peuvent alors être distingués : l'infra, la micro et la macro-texture correspondant respectivement aux particules élémentaires, aux agrégats et à l'arrangement des agrégats entre eux.



Figure 2.2.4 : Texture des sols gonflants (d'après Gens & Alonso, 1992)

Gens et Alonso (1992) ont repris ce schéma d'organisation, qu'ils qualifient de « double structure » comme fondement de leur modèle de comportement des sols gonflants

2.3 Définitions des unités de l'espace poreux

Par ailleurs, à partir de ces différents modèles de structure, les espaces poreux correspondants ont aussi été définis avec la même richesse terminologique : vides inter-(foliaires, lamellaires, particulaires, agrégats), intra-(particulaire, agrégat, domaine). On parle aussi de micro-pores, méso-pores et macro-pores.

Des auteurs ont utilisé, parallèlement à la microscopie électronique à balayage ou à la microscopie électronique à transmission, des méthodes indirectes telles que la porosimétrie par injection de mercure et/ou le BET pour décrire de façon quantitative et globale la porosité des sols argileux (Diamond, 1970 ; Delage, 1979 ; Vayssade, 1978 ; Parcevaux, 1980 ; Arnould et al., 1980 ; Tessier, 1984 ; Delage et Lefebvre, 1984 ; Audiguier et Delage, 1987 ; Griffiths et Joshi, 1990 ; Al-Mukthar, 1995 ; Qi, 1996 ; Tanaka et Locat, 1999 ; Guillot, 2002).

La classification des pores donnée par Touret et al. (1990) et reprise par différents chercheurs (Durand et al., 1995 ; Qi, 1996 ; Al-Mukthar et al., 1996 ; Robinet et al., 1996 ; Guillot, 2002 ; Van Damme, 2002...), paraît assez complète et passe en revue les différents types d'espace poreux dans les sols argileux.

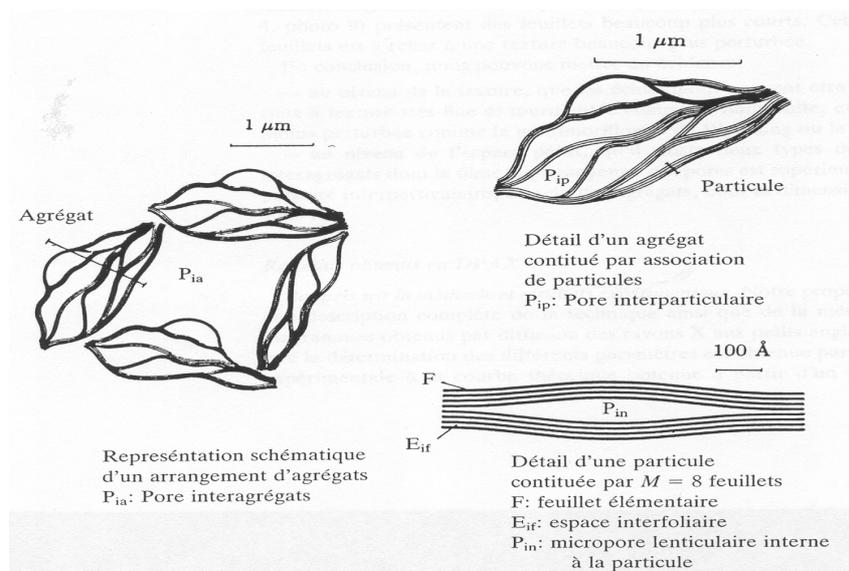


Figure 2.3.1 : Représentation schématique des différents types de pores (d'après Touret et al., 1990)

Ces auteurs ont proposé quatre types d'arrangement de l'espace poreux (Figure 2.3.1) :

- l'espace interfoliaire (ou interlamellaire) existant à l'intérieur des empilements périodiques de feuillets au sein des paquets (ou « particules ») ;
- les pores lenticulaires correspondant aux zones de défauts où deux zones périodiques ont un écartement supérieur à la distance interfeuillets (Van Damme, 2002), au sein d'un même paquet (ou particule). Cette porosité inter-feuillets est due à la déformabilité ou la flexibilité des feuillets et peut atteindre une taille de 100 Å. Elle peut être ouverte ou fermée à la pénétration de l'eau (Qi, 1996) ;

- les *pores interparticulaires* correspondant à la porosité entre « particules », au sein d'entités plus grandes appelées « agrégats ». Ces pores ont une taille maximale de l'ordre du micron ;
- Les *pores interagrégats* correspondant aux vides entre les agrégats, leur taille étant au moins égale au micromètre.

Al-Mukhtar et al (1996) et Robinet et al (1996), s'appuyant sur des ouvrages de différents auteurs, ont donné la taille moyenne des classes de pores définies ci-dessous :

- 1 à 2,5 nm pour les pores interfeuilletés ou intraparticulaires ;
- 2,5 à 150 ou 200 nm pour les pores interparticulaires ou intra-agrégats ;
- supérieure à 150 ou 200 nm pour les pores interagrégats.

Dans le tableau ci-dessous, est représentée la taille des pores décrite par les termes micro, méso et macro selon Case et al (1990)

Ultramicroporosité	Microporosité	Mésoporosité	Macroporosité
$D < 0,8 \text{ nm}$	$0,8 \text{ nm} < D < 2 \text{ nm}$	$2 \text{ nm} < D < 50 \text{ nm}$	$> 50 \text{ nm}$

Enfin, il faut souligner que l'organisation des particules d'argiles est extrêmement variable d'un type d'argile à un autre, d'un mode de sédimentation à un autre, et d'un état de consolidation à un autre. Arnould et al (1980) ont bien noté que le type de texture et le spectre de porosité des sols argileux sont largement influencés par la nature et la quantité de particules argileuses (smectite ou non) et par le pourcentage et la taille des éléments non argileux.

Le comportement hydrique et mécanique des sols argileux dépend de cette organisation et plus particulièrement de la cohésion ou de la liaison entre les différentes entités (particules, agrégats, grains,...) à l'origine de cette organisation. La morphologie de cet assemblage conditionne largement les interactions eau-sol et ainsi le phénomène de retrait-gonflement.

3 Le système eau-argile

3.1 Mécanismes d'hydratation à l'échelle des particules argileuses

Plusieurs phénomènes d'hydratation se présentent à l'échelle des particules argileuses, avec différentes catégories de forces en jeu.

3.1.1 Hydratation par adsorption

En présence de vapeur d'eau, les minéraux argileux adsorbent de l'eau sur leur surface libre. L'origine de ce phénomène est due à l'existence d'un déficit de charge et à la présence de sites actifs sur les particules argileuses. Selon Prost (1990), au cours de l'imbibition d'un matériau sec, les molécules d'eau se fixent en premier lieu sur les sites hydrophiles représentés par les cations compensateurs, les groupes hydrophiles ou les cations de bords de feuillets. La jonction de ces sites hydrophiles hydratés forme un film d'eau monomoléculaire continu à la surface des particules. Puis sur ce film, apparaît le phénomène d'adsorption multicouche, correspondant à la superposition de n couches monomoléculaires d'eau.

Par conséquent, les dimensions des feuillets et celles des particules formées jouent un rôle important dans les propriétés d'adsorption. De ce fait, on peut imaginer que les smectites qui ont une surface accessible à l'eau beaucoup plus élevée que celle de l'illite ou de la kaolinite retiennent beaucoup plus de molécules d'eau d'hydratation (appelée eau interfaciale par Van Damme, 2002). Ce phénomène d'hydratation peut avoir lieu sur la totalité des surfaces des particules argileuses à condition que les molécules d'eau soient en mesure de pénétrer les vides ménagés dans la structure (entre feuillets, plaquettes, ou agrégats). Dans le cas des smectites par exemple, l'hydratation peut se faire dans les espaces inter-foliaires, inter-particulaires et inter-agrégats. Par contre, pour l'illite et la kaolinite, l'hydratation est limitée aux espaces inter-particulaires et inter-agrégats puisque l'espace inter-foliaire n'est pas accessible à l'eau.

Mitchell (1993) a proposé plusieurs mécanismes susceptibles d'expliquer le phénomène d'adsorption :

- les liaisons hydrogène qui se développent entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène ou les hydroxydes situés sur la surface du feuillet argileux (Figure 3.1.1a) ;
- l'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés électriquement par les défauts de charge du feuillet (Figure 3.1.1b) ;
- les dipôles des molécules d'eau attirés électriquement par les feuillets argileux chargés négativement (Figure 3.1.1a, c) ;
- les molécules d'eau liées à la surface argileuse par des forces de type Van der Waals.

La rétention d'eau dépend, entre autres facteurs, de la taille des particules et de celle des agrégats, de l'énergie d'hydratation des cations compensateurs, mais aussi des différents types de porosité.

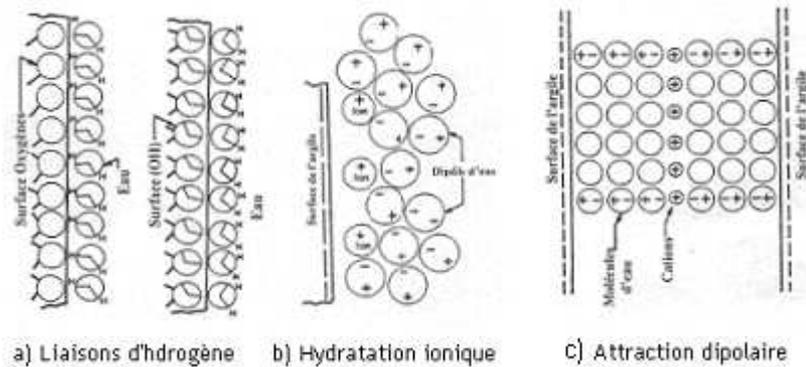


Figure 3.1.1 : Interactions eau-argile (d'après Mitchell, 1993)

3.1.2 Hydratation par capillarité

Néanmoins, l'eau adsorbée ne représente que 3 ou 4 couches monomoléculaires et l'eau qui n'est pas adsorbée sur les sites hydrophiles de l'argile est retenue, à partir de transferts en phase vapeur, par condensation aux points de contact entre particules ou agrégats (Prost, 1990). Cette dernière est appelée *eau capillaire*. Ses propriétés sont modifiées par la présence et la courbure des interfaces liquide-vapeur (Van Damme, 2002) qui sont responsables du remplissage des pores. Prost (1990) montre que, en phase vapeur, l'hydratation par capillarité s'effectue tout d'abord aux points de contact entre les particules et ensuite par remplissage des pores.

3.1.3 Hydratation par osmose

Il s'agit de l'eau attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage des feuillets. Le phénomène s'explique par le modèle de la double couche diffuse.

Dans ce modèle, les cations compensateurs ne sont pas maintenus directement à la surface de la particule argileuse mais ils sont présents à une distance moyenne de la surface. Il s'établit un équilibre entre l'agitation thermique des ions, qui tend à les éloigner de la particule et l'attraction coulombienne qui tend à les maintenir près du feuillet. La distribution statistique de ces ions a donné lieu à différents modèles proposés par Gouy (1910) et Stern (1924).

Les cations inter-foliaires, bien qu'hydratés, sont attirés par la surface négative des feuillets. Le modèle de la double couche de Gouy-Chapman (1913), raffinée par Stern (1924), repose sur l'hypothèse que la population des cations attirés par la surface pour rétablir l'électroneutralité à son voisinage, peut être séparée en deux couches. Une couche de cations immobiles liés à la surface, appelée couche de Stern, et une deuxième couche de cations mobiles au voisinage de la surface appelée couche diffuse. L'ensemble de ces deux couches constitue la double couche électrique de la particule en suspension (Figure 3.1.2).

Si la concentration de l'eau libre de la solution est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, il en résulte alors une migration des molécules d'eau de la solution vers les particules argileuses par phénomène d'osmose et en conséquence une dilution de concentrations élevées des ions à l'intérieur de l'espace interfoliaire.

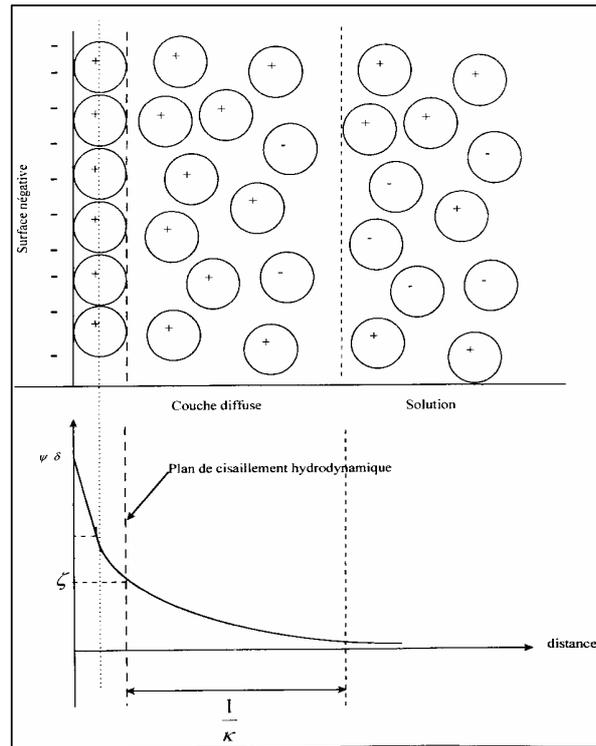


Figure 3.1.2 : Schéma de la double couche selon le modèle de Stern (1924)

3.1.4 Eau interne et externe

Dans la littérature on trouve aussi la notion d'eau interne et externe. Ainsi, pour Durand et al. (1995) et Qi (1996), l'eau correspondant à l'hydratation des cations échangeables et l'eau pénétrant dans l'espace interfoliaire par le mécanisme d'osmose est appelée eau interne. Celle qui se trouve dans les pores inter-particulaires et inter-agrégats forme l'eau externe.

La proportion d'eau interne et externe dépend de la nature de l'argile, des cations échangeables, de la température et de la salinité de l'électrolyte. Ainsi la présence des cations Na^+ et Mg^+ favorise l'eau interne, à l'opposé des cations Ca^{++} et K^+ favorisent l'eau externe. De même, les fortes températures ou salinités défavorisent l'eau interne (Turki, 1983 d'après Durand et al., 1995).

3.2 *Les Forces intervenant dans le système eau-argile*

Différentes catégories de forces attractives et répulsives interviennent dans le système eau-argile. Elles sont d'intensité variable suivant la taille des particules élémentaires, la salinité de l'eau interstitielle, l'échelle considérée (distance à la surface des particules) (Van Damme, 2002).

3.2.1 Forces capillaires

Les forces capillaires, attractives, sont à l'origine du phénomène de condensation capillaire lorsque l'eau est un fluide mouillant pour les surfaces de contact, ce qui est généralement le

cas pour les sols argileux. Ces forces interviennent à l'échelle des grains et des agrégats, ainsi qu'à l'échelle des micro-aspérités de surfaces des particules. C'est une échelle principalement micrométrique.

3.2.2 Forces de Van der Waals

Les forces de Van der Waals sont des forces attractives entre dipôles (asymétrie électrique des atomes ou molécules). Cette interaction est additive entre tous les atomes des deux particules qui interagissent. Ces forces sont définies par une loi en puissance et dépendent des propriétés diélectriques des matériaux du milieu. A température ambiante, l'attraction de Van der Waals devient inférieure à l'agitation thermique dès que la distance entre particules est de l'ordre de quelques fois le rayon pour des particules sphériques ou de quelques fois l'épaisseur pour des plaquettes (Van Damme, 2002).

3.2.3 Forces de corrélation ioniques

Les forces de corrélation ioniques sont des forces attractives de doubles couches. La mobilité des ions dans le milieu aqueux entre les particules, entraîne une polarisation des nuages ioniques qui interagissent par un mécanisme analogue à celui des forces de Van der Waals connu sous le nom de force de corrélation ionique. Ces forces varient avec la mobilité des ions et leur charge. Elle peut être importante en-dessous de 4 nm.

3.2.4 Forces osmotiques

Les forces osmotiques sont des forces répulsives de doubles couches. Les répulsions électrostatiques interviennent lorsque les particules portent des charges de même signe et que leurs doubles couches électriques interfèrent et se repoussent. Cette concentration forcée d'ions au contact des surfaces est à l'origine d'une force répulsive de nature osmotique. Ces forces osmotiques sont directement liées à la concentration saline de l'eau interstitielle et à l'épaisseur de la double couche (épaisseur d'autant plus petite que la valence des ions est forte et que la concentration saline de la solution est élevée) (Van Damme 2002).

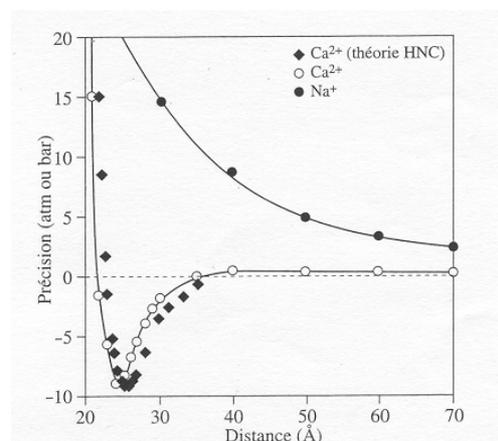


Figure 3.2.1 : Evolution des pressions résultant des forces d'origine électrostatique (forces de corrélation ionique attractives et forces osmotiques répulsives) entre deux feuillets de montmorillonite, en fonction de la distance de séparation (d'après Van Damme, 2002)

Ces deux types de forces, forces de corrélation ionique et forces osmotiques, sont antagonistes et fonction de différents paramètres comme la densité de charge, la polarisabilité du milieu, etc., le phénomène de répulsion peut être complètement annihilé et seul le phénomène d'attraction s'exercera (Figure 3.2.1). Ces forces interviennent à une échelle principalement nanométrique.

3.3 Potentiel de l'eau interstitielle

Selon le comité de la Société Internationale de la Science du Sol pour la terminologie en physique du sol le *potentiel total de l'eau du sol* est défini comme étant « la quantité de travail nécessaire par quantité unitaire d'eau pure pour transférer réversiblement et isothermiquement, une quantité infinitésimale d'eau à partir d'un réservoir d'eau pure à une cote donnée et à la pression atmosphérique standard jusqu'au volume élémentaire représentatif centré sur un point considéré du sol » (Hillel, 1988).

L'eau du sol est sujette à un certain nombre de champs de forces qui font que son potentiel diffère de celui de l'eau pure et libre (Hillel, 1988). Ces champs de forces sont dus à l'attraction de la matrice solide pour l'eau, aussi bien qu'à la présence de solutions, et à l'action de la pression du gaz extérieur et de la gravité. Ainsi, le potentiel total de l'eau interstitielle peut être considéré comme étant la somme des contributions de chacune des ces forces par rapport au même état de référence de l'eau. Chaque terme du potentiel se référera alors à la même définition. Dans le paragraphe qui suit, est présenté un bref résumé de ces différentes sous composantes du potentiel total de l'eau du sol.

Le *potentiel total* de l'eau du sol est généralement formé de trois sous composantes :

$$\Phi_t = \Phi_g + \Phi_p + \Phi_\pi$$

Φ_t *potentiel total*

Φ_g *potentiel gravitationnel*

Φ_p *potentiel de pression*

Φ_π *potentiel osmotique*

Le *potentiel gravitationnel* est défini comme étant le travail à fournir pour transférer, réversiblement et isothermiquement, une quantité d'eau pure libre, située à un niveau de référence, jusqu'à une cote donnée. Ce potentiel représente le travail lié au déplacement dans le champ gravitationnel. Il sera positif si le niveau de référence est situé à une cote inférieure, et négatif, dans le cas contraire. En pratique, le niveau de référence pourra être celui de la surface du sol ou celui de la surface de la nappe.

On définit le *potentiel de pression* comme étant le travail à fournir pour transférer une quantité d'eau pure libre d'un niveau de référence donné au même niveau de référence mais avec une variation de pression. Ce potentiel peut être le résultat direct de l'action continue d'une phase liquide (pression d'eau) ou gazeuse (pression pneumatique) mais également de l'effet indirect de pressions exercées sur le matériau lui-même (pression lithostatique) (Tessier, 1984). Le terme de potentiel matriciel est souvent utilisé pour un potentiel de

pression négatif (lorsque la pression de l'eau est inférieure à la pression atmosphérique). Il est défini comme étant la quantité de travail nécessaire pour transporter une eau de composition constante dans le milieu poreux à teneur en eau donnée et cela sans variation de la cote de référence.

Le potentiel osmotique est défini comme étant le travail à fournir pour transformer une eau pure libre située à un niveau de référence en une eau ayant une concentration donnée en soluté. En fait, ce travail est équivalent à l'énergie nécessaire à apporter à la solution pour être à l'équilibre au travers d'une membrane semi-perméable qui est au contact d'une eau pure libre. Cette énergie est liée à la pression osmotique qui est le niveau de pression à laquelle la solution doit être portée pour empêcher tous les flux d'eau au travers de la membrane.

Le potentiel matriciel résulte des forces attractives de capillarité et d'adsorption dues à la matrice solide. *Le potentiel capillaire* est seulement dû à la géométrie du milieu poreux. Les phénomènes de capillarité se produisent à l'interface entre deux fluides, car les molécules y sont soumises à un ensemble de forces d'interaction non équilibrées, à la différence d'une molécule située au sein du fluide. Le potentiel capillaire est une fonction de la pression capillaire qui est la différence entre la pression de l'air et de l'eau, liée à la tension superficielle du couple air-eau et au rayon de courbure moyen du ménisque.

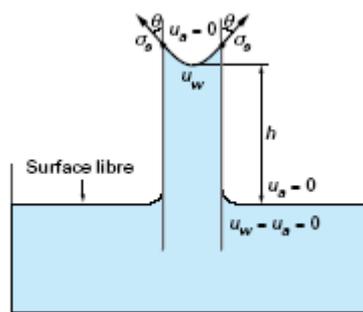


Figure 3.3.1 : Remontée capillaire dans un tube (d'après et Delage et Cui, 2000)

La Figure 3.3.1 montre la hauteur (h) de remontée capillaire de l'eau dans un tube de faible rayon (r), plongé dans un récipient contenant de l'eau. La relation entre le rayon de courbure du ménisque sphérique eau-air dans le tube et la différence de pression entre l'air et l'eau est donnée par la loi de Laplace, qui se simplifie dans l'hypothèse de pores cylindriques et prend l'expression de la loi de Jurin :

$$u_a - u_w = \frac{2\sigma_s \cos\theta}{r}$$

- avec u_a et u_w respectivement les pressions d'air et d'eau,
 σ_s la tension de surface eau - air,
 θ l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide.

Cette relation implique qu'au niveau du ménisque, plus r est petit, plus la pression de l'eau est inférieure à la pression de l'air. En mécanique des sols, la pression atmosphérique est prise nulle par convention, la pression de l'eau dans le tube est donc négative.

Le potentiel d'adsorption est une fraction de la pression de disjonction qui agit sur tous les films liquides fins, et particulièrement dans le cas des milieux argileux, adsorbés à la surface des particules argileuses au travers des films interparticulaires.

Il est ainsi possible de définir le potentiel d'adsorption comme une sous-composante du potentiel matricielle. Donc, dans les milieux argileux, on a :

$$\Phi_m = \Phi_a + \Phi_{pc}$$

Φ_m potentiel matriciel
 Φ_a potentiel d'adsorption
 Φ_{pc} potentiel capillaire

Les expressions « suction matricielle » et « suction de l'eau d'un sol » sont utilisées d'une manière interchangeable pour le « potentiel matriciel ». La suction dans les sols a été définie en géotechnique, dans un contexte thermodynamique, en 1965. Ce potentiel est égal à « la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme, à altitude constante et à la pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol, à celui d'eau interstitielle dans le sol non saturé » (Delage et Cui, 2000).

Pour un sol non saturé, les différentes composantes du potentiel de l'eau comprennent donc les potentiels de pression externe (Φ_{pe}), gravitationnel (Φ_g), capillaire et d'adsorption (dont la somme forme le potentiel matriciel (Φ_m)), et de potentiel osmotique (Φ_{π}). On a donc par définition :

$$\Phi_t = \Phi_{pe} + \Phi_g + \Phi_m + \Phi_{\pi} = \Phi_{pe} + \Phi_g + (\Phi_a + \Phi_{pc}) + \Phi_{\pi}$$

Couramment, la somme des contributions de potentiel matricielle et osmotique est appelée *le potentiel de l'eau* ou *la suction totale*. Il est directement lié à l'humidité relative de la vapeur d'eau en équilibre avec la phase liquide dans le sol.

La suction totale peut également être définie par une des relations fondamentales de la thermodynamique : la loi de Kelvin qui suppose que le matériau soit inerte vis-à-vis de l'eau. Elle est exprimé par l'expression suivante (Delage et Cui, 2000) :

$$\psi = \frac{RT}{gM} \ln\left(\frac{P_v}{P_{vs}}\right)$$

Où :

- ψ : la suction totale (kPa)
- P_{vs} : la pression de vapeur saturante à la température T (kPa),
- P_v : la pression partielle de vapeur (kPa)
- M : la mass molaire de l'eau ($M=18,016 \text{ g. mol}^{-1}$),
- g : l'accélération de la pesanteur ($g= 9,81 \text{ m. s}^{-2}$),
- R : la constante des gaz parfaits ($R= 8,3143 \text{ J. mol}^{-1}. \text{ K}^{-1}$) et
- T : la température absolue (K)

Cette relation est fonction de la température, qui influencera donc le comportement des sols non saturés. On note aussi que, dans le cas d'actions exclusivement capillaires, l'humidité relative de l'air à proximité du ménisque est inférieure à la pression de vapeur saturante et elle est d'autant plus faible que le rayon de courbure est faible. De plus, on remarque que la relation entre l'humidité ambiante et la succion correspondante est indépendante du sol.

En résumé, l'attraction de l'eau par un matériau argileux non saturé ne se réduit pas simplement à l'action de la succion matricielle, des actions d'adsorption physico-chimiques interviennent également.

3.4 Courbes de rétention de l'eau dans le sol

Dans un sol le séchage provoque une diminution de la teneur en eau et ainsi une augmentation de la succion ; d'autre part le remouillage, quelle que soit l'origine de l'eau, entraîne une diminution de la succion. On représente ces variations de succion en fonction de la teneur en eau ou de degré de saturation par une courbe appelée courbe de rétention d'eau (Figure 3.4.1). La courbe de rétention relie donc la teneur en eau volumique à la tension hydrique et exprime la capacité du sol à attirer et retenir l'eau en fonction de la succion exercée. C'est une grandeur macroscopique fondamentale car elle exprime l'influence de la structure, de la porosité et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol (Figure 3.4.1a).

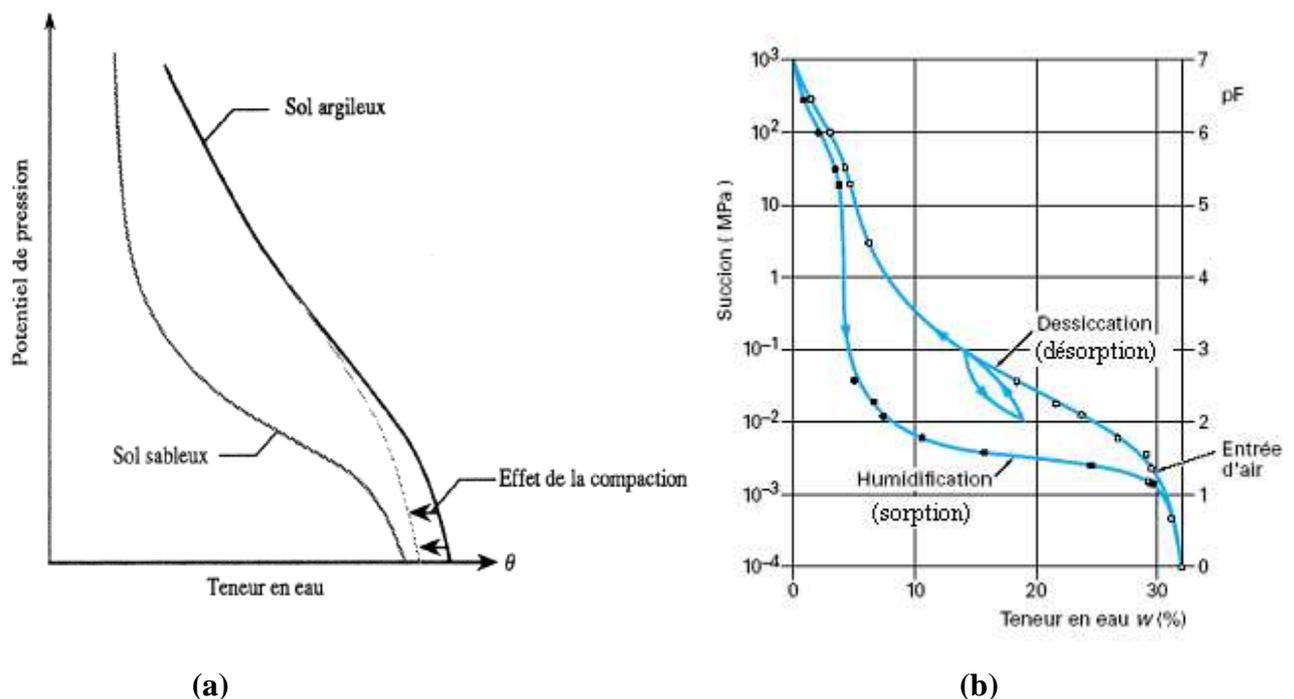


Figure 3.4.1 : Courbe typique de rétention d'eau de différents types de sols : a) influence de la texture et structure sur la rétention de l'eau dans le sol (d'après Musy et Soutter, 1991) ; b) phénomène d'hystérésis (d'après Delage & Cui, 2000)

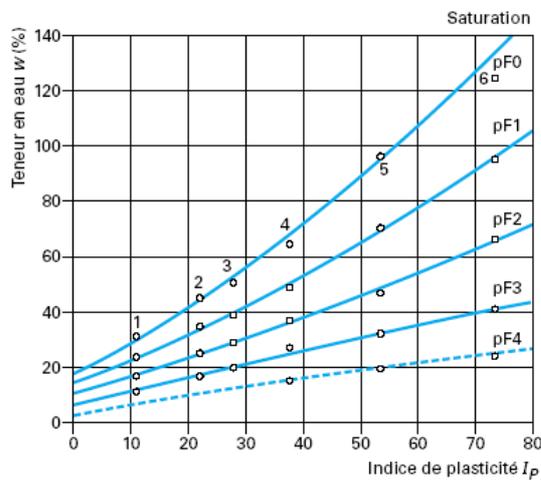
La quantité d'eau retenue à des valeurs de succion faibles dépend principalement de l'effet capillaire et de la distribution des pores et, par conséquent elle est fortement influencée par la structure du sol. A l'inverse, plus la succion est élevée, plus la rétention de l'eau dans le sol

est due au phénomène d'adsorption et est donc en relation directe avec la nature, la taille et la surface spécifique du matériau du sol.

La courbe de rétention de l'eau du sol appelée aussi courbe caractéristique de l'humidité du sol peut être obtenue par drainage, séchage d'un sol initialement saturé, ou bien par humidification, mouillage d'un sol initialement sec. On parlera de courbe de désorption dans le premier cas et de courbe de sorption dans le second (Figure 3.4.1b). La succion critique pour laquelle le pore le plus grand commence à se vider est appelée la « succion d'entrée d'air » ou la « succion de désaturation »

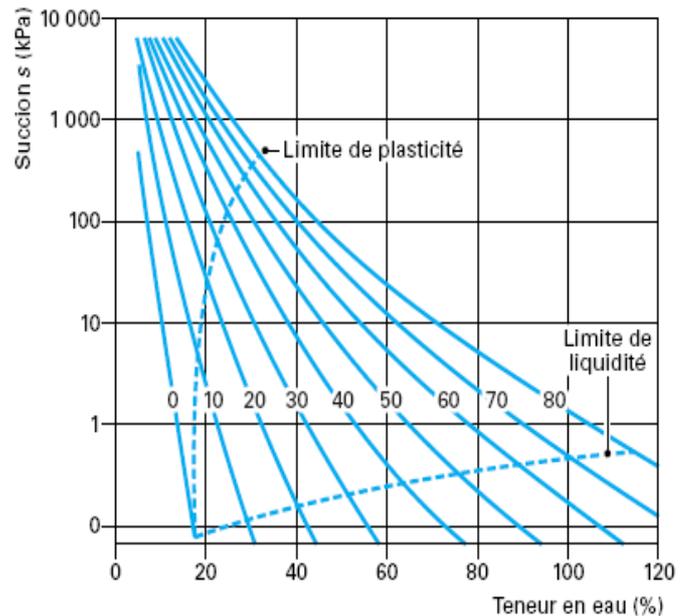
Cependant, les courbes de rétention des sols ne sont pas uniques. La succion correspondant à une teneur en eau donnée, dépend du chemin parcouru pour arriver à cette teneur en eau, Ceci est dû au phénomène d'hystérésis (Figure 3.4.1b) qui est lié à une variation de l'angle de mouillage entre le processus d'humidification et celui de la dessiccation, à la présence d'air piégé dans le sol, aux éventuels couplages hydrodynamiques et à la non-uniformité géométrique des pores (Hillel, 1988).

L'influence importante de la plasticité d'un sol sur ses propriétés de rétention a été mise en évidence dans les travaux de Black (1962 d'après Delage & Cui 2000) sur six sols britanniques de divers indices de plasticité (caractérisés par la relation $I_P = 0,838 w_L - 14,2$). La Figure 3.4.2a montre, dans un diagramme « teneur en eau - indice de plasticité », les teneurs en eau obtenues pour les six sols placés à des succions de 0,1 - 1 - 10 - 100 et 1 000 kPa (c'est-à-dire respectivement à pF 0, 1, 2, 3, et 4). On observe que, sous une succion donnée, la teneur en eau est d'autant plus forte que l'indice de plasticité du sol est élevé.



	Sols	w_L	w_p	I_p
1	Harmondworth brickearth	29	18	11
2	Harmondworth brickearth	42	20	22
3	Harmondworth brickearth	49	21	28
4	Lias clay	62	24	38
5	London clay	82	28	54
6	Aylesbury Gault clay	107	33	74

Ⓐ diagramme de la teneur en eau en fonction de l'indice de plasticité



Ⓑ courbes de rétention d'eau

Figure 3.4.2 : Effets de l'indice de plasticité sur la rétention d'eau de six sols britanniques (Black, 1962 d'après Delage & Cui 2000)

Il est possible de représenter également ces résultats sous forme de courbes de rétention d'eau (Figure 3.4.2b). On observe ainsi clairement l'effet de l'indice de plasticité sur les courbes de rétention d'eau des sols, les courbes sont de plus en plus décalées vers la droite lorsque la plasticité augmente. Deux courbes donnent les valeurs de succion correspondant aux limites de liquidité et de plasticité : la succion est faible à la limite de liquidité ; elle croît rapidement et peut atteindre des valeurs importantes (600 kPa pour $I_P = 80$) à la limite de plasticité. Sachant que la limite de retrait, qui correspond au début de la désaturation et au point d'entrée d'air dans le sol, est inférieure à la limite de plasticité, on en déduit qu'un sol plastique peut atteindre des valeurs de succion importantes avant de se désaturer. Ce fait peut avoir des conséquences importantes en cas de sécheresse car, à l'état saturé (domaine de plasticité du sol), la variation de volume du sol au cours du séchage est égale au volume d'eau qui en est extrait.

Une description complète de la courbe de rétention d'eau d'un sol et des variations de volume induites est représentée sous forme de quatre diagrammes (Biarez et al. 1987, d'après Delage & Cui, 2000). La Figure 3.4.3 montre les résultats obtenus sur une pâte de kaolinite remaniée ($IP = 31$) à une teneur en eau initiale $w = 1,5 W_L$. Sur la Figure 3.4.3B est représentée la courbe de rétention d'eau, tournée de 90 degrés par rapport aux présentations précédentes. Sur la Figure 3.4.3D, sont présentées les variations du degré de saturation en fonction de la succion, cette figure permet de mettre en évidence que la désaturation ne commence qu'à une succion de 1000 kPa. Sur la Figure 3.4.3A, la courbe de retrait est représentée sous forme du diagramme « e-w » et les valeurs des limites d'Atterberg sont mentionnées. Sur la Figure 3.4.3C, est tracé le diagramme « w-Sr », en correspondance avec la courbe de retrait.

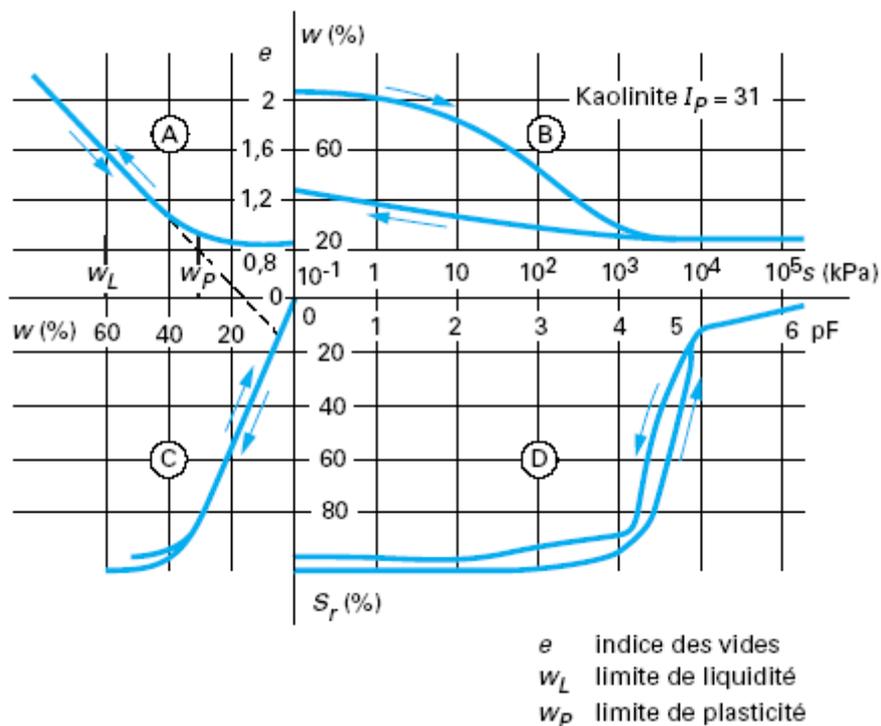


Figure 3.4.3 : Présentation des propriétés de rétention d'eau et de variation de volume en quatre diagrammes (Biarez et al 1987, d'après Delage et Cui, 2000)

L'hystérésis des courbes de rétention d'eau fait qu'il n'existe pas de relation biunivoque entre la succion et la teneur en eau d'un sol non saturé. La zone comprise entre les deux courbes de séchage et de remouillage peut être atteinte en appliquant, par exemple, une diminution de succion, à partir d'un point de la courbe de séchage, ou une augmentation de succion à partir de la courbe de remouillage. Ces situations sont très fréquentes à l'état naturel pour des massifs soumis aux cycles d'humidité climatiques, avec un ensemble de points localisés quelque part entre les deux courbes. Ainsi, la connaissance du profil de teneurs en eau d'un massif n'est nullement suffisante pour en déduire la succion correspondante.

Les sols naturels argileux non cimentés se comportent généralement comme des matériaux plus ou moins surconsolidés. La Figure 3.4.4 montre un cas de matériau naturel prélevé dans la région parisienne. On constate que ce matériau est très faiblement consolidé et que l'on retrouve bien l'analogie entre chemins de drainage et chemin œdométrique mesuré.

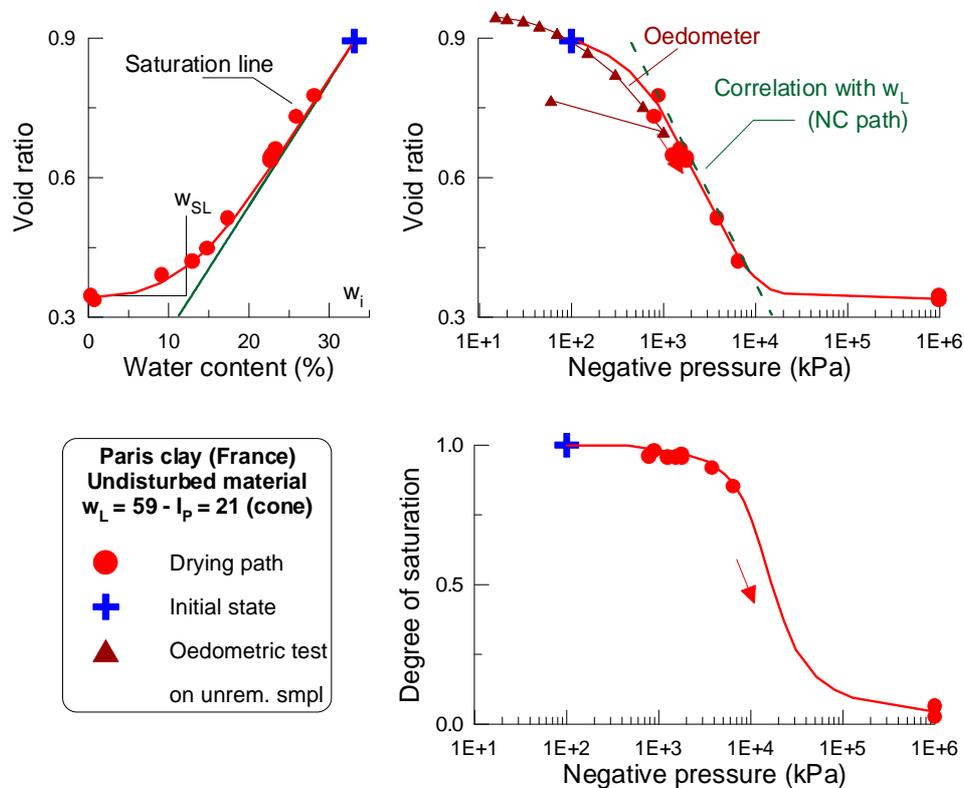


Figure 3.4.4 : Chemin de drainage d'un sol naturel de la région parisienne (d'après Vincent et al., 2006)

4 Les processus de retrait-gonflement : aspects phénoménologiques

4.1 Mécanisme du retrait-gonflement dans le système eau-argile

4.1.1 Introduction

Le gonflement d'un sol peut résulter de la diminution des contraintes en place après une excavation ou un déchargement ou bien de l'imbibition du sol sous un état de contrainte constant. Il se traduit par une augmentation du volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le massif peut se déformer ou non (Serratrice et Soyez, 1996). Cependant, l'augmentation de teneur en eau lors de l'imbibition ne provoque pas toujours une augmentation de volume ou un gonflement. Un sol sec peut s'humidifier simplement par remplacement de l'air contenu dans les vides, sans augmentation conséquente de volume (sol sableux et silteux). Par contre, le gonflement résulte de forces de répulsion qui s'exercent entre certaines particules argileuses, dites actives, entraînant une augmentation de volume à mesure que la teneur en eau s'accroît. Le phénomène macroscopique de gonflement n'est que l'ultime étape d'un processus microscopique.

Le gonflement des particules argileuses est directement lié à leurs propriétés électrochimiques et à leur surface spécifique. Les argiles les plus gonflantes sont les smectites qui ont une surface spécifique nettement supérieure aux autres argiles ; puis viennent les illites et enfin la kaolinite. Yong et Warkentin (1975) ont remarqué que le gonflement est aussi en relation avec l'épaisseur des particules argileuses.

Dans la littérature on trouve les termes *gonflement interfoliaire* et *gonflement interparticulaire*. Le premier terme correspond au gonflement de l'espace entre les feuillets et se manifeste seulement dans des argiles qui ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins (cas des smectites). Il est réversible et intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse et peut présenter une amplitude de gonflement très importante. Le second terme est limité à l'espace entre particules ou entre agrégats et affecte alors toutes les argiles, il peut être de faible ampleur (Parcevaux, 1980 ; Mouroux et al., 1988).

4.1.2 Mécanisme de gonflement

Deux phénomènes ou mécanismes sont avancés pour expliquer le gonflement des sols argileux : le phénomène d'hydratation et le phénomène d'osmose. Ces deux phénomènes sont directement liés aux différentes forces responsables de l'écartement des particules d'argiles. Les gonflements correspondant à ces deux phénomènes sont appelés respectivement le « gonflement cristallin » et le « gonflement osmotique » (Norrish, 1954 ; Madsen et Müller-Vonmoss, 1989 ; Yong, 1999). Dans le premier cas, ce sont les forces d'hydratation surfacique et cationique qui jouent le rôle le plus important pour initier l'écartement des particules argileuses et dans le deuxième cas c'est la force osmotique répulsive d'origine entropique (Van Damme, 2002).

4.1.2.a *Gonflement cristallin*

L'hydratation se produit sur toutes les surfaces des argiles accessibles à l'eau, à tous les niveaux d'organisation. L'énergie d'hydratation cationique et la surface accessible contrôlent le gonflement cristallin.

Dans les smectites, le gonflement cristallin peut se produire jusqu'à l'échelle du feuillet puisque les liaisons interfeuillet sont suffisamment faibles pour laisser pénétrer l'eau dans l'espace interfoliaire. Par contre, dans les illites et les kaolinites il est limité à la surface externe des cristallites (ou domaines) et autour des agrégats.

Ce phénomène d'adsorption d'eau à la surface des particules argileuses est limité à 3 ou 4 couches monomoléculaires, les particules ne sont donc pas écartées de plus de 10 Å (Norrish, 1954; Yong, 1999).

D'après Ben Brahim (1985) cette eau s'organise en couches moléculaires planes dans le cas de phyllosilicates hydratés sous humidités relatives contrôlées. Grim et al. (1933) ont montré l'existence d'hydrates successifs à 1, 2, 3 et 4 couches d'eau correspondant à des distances basales de 12,6 Å, 15,6 Å, 18,6 Å et 21,6 Å. Cette hydratation par palier a aussi été mise en évidence par Mering (1949), Glaser (1953), Norrish (1954) dans le cas de smectites sodiques et par Suquet (1978) et de Calle (1977) dans le cas de vermiculites et de saponites. Le minéral hydraté d'une et jusqu'à 4 couches d'eau interfoliaire est qualifié de solide hydraté (Pons, 1980, 1981 ; Ben Rhaïem et al., 1986). Van Olphen (1977, d'après Yong, 1999) a noté que l'adsorption de 4 molécules d'eau dans l'espace interfoliaire des montmorillonites peut entraîner une augmentation de volume d'une argile sèche de l'ordre de 100 %.

De son côté Norrish (1954), étudiant le gonflement de la montmorillonite sodique, a noté que, jusqu'à une humidité relative de 99 %, une faible part du gonflement macroscopique se produit. Cependant, à ce stade de l'hydratation, l'argile peut adsorber jusqu'à 0,5 gramme d'eau par gramme de minéral anhydre, et l'espace interfoliaire peut augmenter de 9,5 Å pour l'argile sèche, à environ 20 Å pour l'argile hydratée (correspondant à quatre molécules d'eau pour une épaisseur de couche moléculaire de 2,93 Å). Ceci correspond à une porosité de 57 % et un indice des vides de 1,35 (Durand et al, 1995).

En revanche, lorsque cette argile est mise en contact direct avec de l'eau (« gonflement en présence d'eau - gonflement macroscopique »), selon ce même auteur, elle peut adsorber jusqu'à 10 grammes d'eau par gramme d'argile avec une augmentation de 20 fois son volume (correspondant à une porosité de 96 % et un indice des vides de 27) (Durand et al, 1995). La distance interfoliaire est alors de l'ordre de 300 Å (Tran Ngoc Lan, 1987).

D'après Yong (1999 a et b), tant qu'il existe une quantité d'eau suffisante pour l'hydratation, le gonflement cristallin peut se produire, c'est ce mécanisme de gonflement qui est initialement observé lorsque les sols argileux secs sont mis en contact avec de l'eau.

4.1.2.b *Gonflement Osmotique*

Le gonflement osmotique se produit lorsque l'énergie d'hydratation est suffisante pour franchir la barrière de potentiel due aux forces électrostatiques attractives entre feuillets. Au-delà de la deuxième couche d'eau adsorbée à la surface d'un feuillet, l'eau perd ses propriétés d'eau liée et devient de l'eau libre.

En fait, la pénétration de l'eau se poursuit au-delà de 4 couches d'eau par un deuxième processus, continu cette fois-ci, qui est le gonflement proprement dit. Il est principalement dû à la formation de la double couche diffuse (Norrish, 1954 ; Norrish & Raussel-Colom, 1963 ; Ben Rhaiem et al, 1987). Les distances interfoliaires passent brusquement de 21,6 Å (hydrate à 4 couches d'eau) à 30 Å et au-delà, sans que l'on puisse mettre en évidence de distances comprises entre ces deux valeurs (Ben Rhaiem et al., 1986 et 1987 ; Pons et al., 1987). On parle alors de « gap » (Figure 4.1.1). Ce phénomène conduit à une importante prise d'eau du matériau.

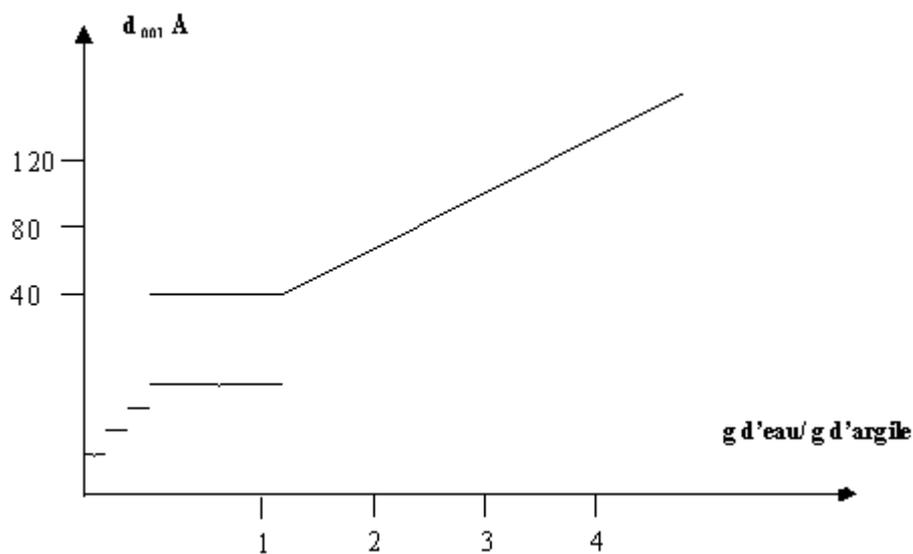


Figure 4.1.1 : Gonflement d'une montmorillonite Na avec mise en évidence du gap d'après Norrish (1954)

Approche de la double couche

En effet, lorsqu'une particule argileuse avec une nette charge négative à la surface est en contact avec une solution aqueuse, des cations sont attirés à la surface des particules par le champ électrique et une charge nette, en excès, de signe opposé à celui de la surface se forme à proximité. L'agitation thermique donne à cet excès d'ions la forme d'une "atmosphère ionique" plus ou moins diffuse (Sridharan et al., 1986; Van Damme, 2002) qui s'étend jusqu'à une certaine distance de la surface de la particule. L'équilibre de l'attraction électrique et de la diffusion thermique mène à une couche diffuse de cations avec une concentration plus élevée sur la surface qui diminue graduellement en s'éloignant de la surface (Figure 4.1.2). L'ensemble de la particule chargée négativement plus la concentration de cations autour de la particule constitue la double couche diffuse (Bolt, 1956). La formation de la double couche diffuse entraîne le gonflement ou la pression de gonflement du matériau argileux. Cette double couche dépend des caractéristiques des minéraux argileux mais également de la chimie de la solution hydratante.

Les cations qui constituent la double couche sont attirés par le champ électrique des particules argileuses et ils ne peuvent pas s'éloigner de la surface de la particule. Par contre, l'eau peut circuler dans le milieu. Le champ électrique des particules argileuses joue donc le rôle d'une membrane semi-perméable en laissant passer l'eau mais pas les ions. Et lorsque deux particules se rapprochent à des distances telles que les doubles couches interagissent, une concentration élevée d'ions retenus par les forces électrostatiques se forme dans l'espace

interfoliaire, tout en restant sujets à l'agitation thermique. Cette concentration forcée d'ions, produit une force de nature osmotique répulsive (Van Damme, 2002). Cette force d'origine entropique (Van Damme, 2002) est responsable du gonflement osmotique qui se produit lorsque la concentration ionique de l'eau interstitielle est beaucoup plus faible que celle de la zone de la double couche. L'eau pénètre alors dans cette dernière par phénomène d'osmose jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre les différentes forces agissant sur le feuillet.

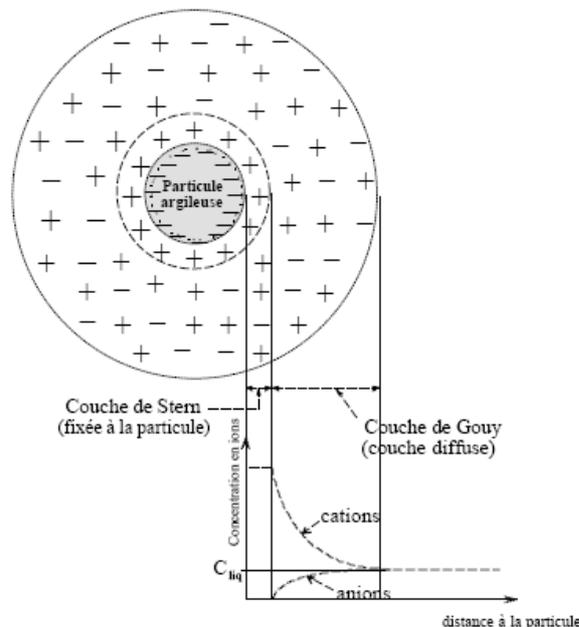


Figure 4.1.2 : Schéma de la double couche (d'après Bultel, 2001)

Théorie de Gouy-Chapman

Plusieurs théories ont été développées pour décrire mathématiquement la distribution d'ions à la proximité des surfaces chargées. Une de ces théories, qui a suscité la plus grande attention (Gens et Alonso, 1992 ; Michell, 1993), est celle la double couche diffuse de Gouy-Chapman (1913), qui a été raffinée par Stern (1924). Cette théorie est souvent utilisée pour interpréter le comportement mécanique de l'argile au niveau microscopique et est appliquée dans la modélisation du gonflement et de la compressibilité d'argiles dans le système argile-cation-eau (Bolt, 1956 ; Sridharan et Jayadeva, 1982 ; Madsen et Müller-Vonmoss, 1989 ; Yong et Mohammed, 1992 ; Sridharan et Choudhury, 2002 ; parmi d'autres).

L'expression donnant l'épaisseur de la double couche est dérivée des équations de Poisson-Boltzmann avec de nombreuses hypothèses restrictives (pas d'interaction ionique, particules finies et parallèles, pas de force attractive, etc.) (Parcevaux, 1980; Sridharan et Jayadeva, 1982; Sridharan et al, 1986; Mitchell, 1993; Delage et Cui, 2000) :

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{DkT}{8\pi\epsilon_0\epsilon^2 z^2}} \quad (\text{I-1})$$

avec :

- 1/K : épaisseur de la double couche
- D : constante diélectrique du milieu liquide
- k : constante de Boltzmann
- ε : charge électrique de l'électron
- T : température absolue
- z : valence des cations
- n_0 : concentration ionique du milieu liquide

Cette expression montre que l'épaisseur de la double couche, et donc le gonflement, augmente avec l'augmentation de la constante diélectrique et de la température et avec une diminution de la valence des ions dissous et de la concentration en sels.

Application de l'approche de la double couche

La double couche diffuse peut se développer aussi bien au niveau des feuillets qu'au niveau des particules argileuses. Lorsque deux doubles couches de particules voisines interagissent, la pression osmotique tendant à favoriser la pénétration de l'eau dans l'espace interparticulaire (Tran Ngoc Lan, 1987) agit vis-à-vis des deux particules comme une force de répulsion, les empêchant de se rapprocher. L'expression de cette pression osmotique ou pression de gonflement est donnée par l'équation de Van't Hoff (pour des ions monovalents) (Bolt, 1956 ; Yong et Warkentin, 1975 ; Parcevaux, 1980 ; Tran Ngoc Lan, 1987) :

$$P = RT (C_c - C_o) \quad (I-2)$$

avec:

- P : pression osmotique de répulsion ou pression de gonflement
- R : constante des gaz parfaits
- T : température absolue
- C_c : concentration de la double couche
- C_o : concentration du liquide interstitiel

Par ailleurs, à partir de cette même théorie, Sridharan et Jayadeva (1982) ont démontré que l'équation (I-2) est équivalente à l'équation de Langmuir, et la pression de répulsion (ou gonflement) peut s'écrire :

$$P = 2n_0kT (\cosh u - 1) \quad (I-3)$$

avec:

$$u = 2,35 - 4,375 \lg (kd)$$

$$d = \frac{e}{\gamma_s S} \quad \text{avec} \quad 1 + e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d}$$

- n_0 : concentration ionique du milieu liquide
- k : constante de Boltzmann
- u : potentiel électrique (sans dimension) à mi-distance des deux particules argileuses. Dépend lui même :
 - de la demi-distance entre les particules (d) ;
 - des propriétés du sol (surface spécifique du sol, capacité d'échange cationique) ;
 - des propriétés de l'électrolyte (concentration, constante diélectrique du milieu, valence).

e indice des vides
 γ_s, γ_d respectivement, poids volumique des particules solides, et du sol sec

On remarque que, pour un sol dont la minéralogie et le fluide interstitiel sont connus, la pression P ne dépend que de la demi-distance interparticulaire d et du poids volumique du sol sec γ_d . La pression de répulsion est alors une fonction strictement décroissante de la demi-distance interparticulaire.

Cependant, les forces moléculaires attractives, connues sous le nom de forces de corrélation qui sont générées par la fluctuation de concentration ionique, se développent entre deux doubles couches si la distance entre elles est suffisamment faible (Van Damme, 2002). Cette force attractive, à la différence de la force répulsive, dépend en plus de la distance entre les doubles couches et de l'épaisseur de la particule (Sharma, 1998). Ainsi, le gonflement ou la compressibilité des sols argileux est une fonction d'équilibre entre les forces résultantes internes attractives et répulsives de la double couche et la force externe appliquée.

Discussion concernant l'application de l'approche de la double couche

La théorie de la double couche a été appliquée dans la prévision du comportement mécanique d'argiles saturées par de nombreux auteurs dont Bolt (1956), Sridharan and Venkatappa-Rao (1973), Sridharan et Jayadeva, (1982), Yong et Mohammed (1992), Mitchell (1993), Sridharan et Choudhury, (2002). Ils ont démontré que la concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux obtenus sur la compressibilité mécanique des argiles est relativement bonne sous certaines conditions. Ainsi, pour des montmorillonites dont l'épaisseur est inférieure à $0,2 \mu\text{m}$ et dont la concentration de l'électrolyte NaCl est de 10^{-4} M , les résultats expérimentaux et théoriques entre la distance interfoliaire et la pression de gonflement sont concordants. Par contre, c'est beaucoup moins satisfaisant lorsque la concentration de l'électrolyte est plus élevée ou pour des particules d'argiles dont l'épaisseur est plus grande telle que l'illite (Bolt, 1956).

Madsen et Müller-Vonmoos (1989) ont noté une bonne concordance entre les pressions de gonflement théoriques et expérimentales à partir d'une étude sur 19 échantillons d'argilite surconsolidée.

Par contre, d'autres auteurs ont souligné les limites de cette théorie. Sposito (1989, d'après Mitchell, 1993) indique que cette théorie s'applique seulement aux électrolytes monovalents et dans une solution diluée ($< 100 \text{ Moles.m}^{-3}$). Les résultats concernant le gonflement ne sont pas satisfaisants lorsque la solution contient des cations bivalents. Il a aussi noté qu'environ 75% des ions de la double couche diffuse se situent à une distance d'environ 10 \AA de la surface des particules.

Low (1980), en menant de nombreuses expériences sur des montmorillonites sodiques, a noté que la couche diffuse est peu développée. Il pense ainsi que le mécanisme de base pour le gonflement des argiles est l'interaction entre les feuilletts argileux et l'eau (ou l'hydratation) et non le phénomène osmotique.

Van Damme (2002) a remarqué que l'expansion qui suit le phénomène d'hydratation dépend du type de cation. Pour les montmorillonites sodiques, les forces osmotiques répulsives sont toujours dominantes par rapport aux forces attractives qui sont générées par les fluctuations de

concentration ionique. Donc, la double couche peut se développer et l'expansion peut ainsi se poursuivre. De nombreux auteurs (Bolt, 1956 ; Tessier, 1984 ; Mitchell, 1993, etc.) sont arrivés à la même conclusion. En revanche, dans les montmorillonites calciques, quelle que soit la charge de surface des particules, les ions Ca^{2+} induisent un régime attractif pour des distances comprises entre 0,6 et 1,2 nm, donc la couche diffuse ne peut pas se développer et l'expansion est ainsi limitée à l'écartement obtenu par les forces d'hydratation. Ceci explique les différences de comportement entre une argile sodique et une argile calcique.

Cependant, Tessier (1984) a remarqué que le gonflement observé pour les montmorillonites Ca, Mg, Na en présence d'un électrolyte concentré, ainsi que pour les illites et les kaolinites ne peut pas s'expliquer de manière satisfaisante par le seul gonflement dû à l'hydratation. Il a donc formulé deux hypothèses susceptibles d'être à l'origine de la formation d'une porosité lors de la réhumectation, dans le cas des smectites Ca, Mg, Na, en présence d'une solution concentrée : soit un phénomène de relaxation mécanique dans le système eau-argile, soit un mécanisme lié à la tension interfaciale solide-liquide qui serait à l'origine d'un processus de "clivage" au niveau des sous-empilements de quasi-cristaux. La première hypothèse rejoint les observations faites par Ladd (1960), Yong et Warkentin (1975) qui ont noté une contribution de la relaxation élastique dans le phénomène de gonflement lorsque la teneur en eau du sol est faible.

Les limites de la théorie de la double couche pour des sols compactés sont aussi rapportées par de nombreux auteurs (Pusch, 1982 ; Yong et Mohamed, 1992 ; Komine and Ogata, 1996, 2004 ; Sridharan et Choudhury, 2002 ; Tripathy et al., 2004 ; etc.). Ils ont remarqué que la concordance entre les données expérimentales et celles dérivées de la théorie de la double couche ne sont pas satisfaisantes. Selon Pusch (1982), la différence est due au fait que pour un sol à forte densité, les doubles couches ne se développent pas ou seulement en partie. Yong et Mohammed (1992) et Sridharan et Choudhury (2002) ont attribué cette différence au rôle important de la force d'hydratation lorsque l'espace entre les particules est réduit par le phénomène de compaction.

La théorie de la double couche ne prend pas en compte certains facteurs comme l'arrangement non parallèle des particules dans le sol, l'effet de la taille des ions, l'adsorption d'anions, et l'existence de forces attractives qui doivent cependant jouer un rôle déterminant dans l'hydratation des argiles.

Cependant la théorie de la double couche présente l'avantage de pouvoir calculer les effets de la concentration de l'électrolyte, de la constante diélectrique, de la valence cationique, et de la température, même si elle reste évidemment limitée par les hypothèses émises sur le milieu (pas d'interaction entre les ions, problème bidimensionnel, particules parallèles, etc.). On peut, en première approximation, dire que la théorie de la double couche est applicable quand la source du gonflement est la pression de répulsion osmotique, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de sols sursaturés en cations en présence d'un soluté à faible concentration ionique.

4.1.2.c Rôle des cations compensateurs

La nature des cations compensateurs joue un rôle important dans le processus de gonflement. Hendricks et al (1940) ont été les premiers auteurs à s'intéresser au rôle des cations échangeables au début du processus d'hydratation. Il ressort des nombreuses études réalisées sur les propriétés d'hydratation et de dispersion des phyllosilicates gonflants qu'il existe deux

groupes de cations compensateurs (Norrish, 1954 ; Ben Rhaïem et al., 1986, 1987 ; Touret et al., 1990) :

- ceux qui permettent d'obtenir la dispersion maximale pour tous les phyllosilicates possédant des propriétés d'hydratation ;
- ceux qui ne permettent qu'une hydratation limitée à quelques couches d'eau (2 à 4 suivant le minéral).

Norrish (1954) a relié le gonflement des particules argileuses aux mécanismes d'hydratation des cations en les classant par valeurs décroissantes de leur énergie d'hydratation. Il obtient le classement suivant : $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Cs}^+$.

4.1.3 Aspect énergétique du gonflement

Le processus de gonflement peut aussi s'exprimer en terme d'énergie. Les propriétés d'hydratation, de gonflement et de dispersion des phyllosilicates n'existent que parce que l'énergie de cohésion interfoliaire est suffisamment faible pour que les molécules d'eau puissent pénétrer entre les feuillets. Mamy (1968) a montré que l'aptitude d'un phyllosilicate à s'hydrater résultait de la concurrence entre deux processus mettant en jeu :

- EA : l'énergie d'attraction des molécules d'eau qui comprend à la fois l'énergie d'interaction cation-eau et l'énergie d'interaction entre les molécules d'eau et les feuillets (eau-eau et eau-feuillet) ;
- EC : l'énergie de cohésion interfeuillet qui dépend des forces de liaisons entre feuillets adjacents.

Le bilan énergétique conduit à une expression schématique de l'énergie d'adsorption ou d'hydratation de l'argile $E = EA - EC$. Les facteurs EA et EC dépendent de plusieurs paramètres, ce qui rend le mécanisme complexe.

L'énergie de cohésion EC dépend principalement des cations interfoliaires (nature, nombre par maille) et de l'origine de la charge des feuillets (ordonnés ou non) (Mamy, 1968).

On peut ainsi expliquer l'existence de divers modes de gonflement de la façon suivante : lorsque la cohésion interfeuillet reste élevée au cours de l'hydratation, celle-ci se limite à quelques couches d'eau et peut même parfois ne pas se produire du tout. Le cas typique est celui de la montmorillonite-Ca, pour laquelle $EC > EA$ dès l'adsorption de la deuxième couche.

Si la cohésion interfeuillet devient très faible on a alors $EA > EC$ et le nombre de couches d'eau devient très élevé, conduisant, comme dans le cas de la montmorillonite-Na, à la dispersion des feuillets.

4.2 De l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique

4.2.1 Equilibre d'une particule argileuse dans un milieu saturé

Dans un milieu saturé, un bilan des forces permet de montrer rapidement qu'une diminution des contraintes effectives entraîne un gonflement.

Considérons deux particules argileuses que l'on peut représenter comme plates et parallèles, immergées dans une solution électrolytique. Elles sont soumises d'une part, à une contrainte extérieure (contrainte effective σ') et d'autre part, à une pression due aux forces électriques (Figure 4.2.1). Les pressions engendrées par les forces électriques se composent de la pression osmotique, P_r , due aux forces de répulsion et de l'attraction, P_a , due aux forces de corrélation (forces de Van der Waals), qui dépend de la distance $2d$ entre les particules et décroît très rapidement avec cette distance.

Pour maintenir les particules à la distance $2d$, il faut que la contrainte ($P_r - P_a$) équilibre la contrainte de compression σ' , donc elle doit être répulsive $\sigma' = P_r - P_a$

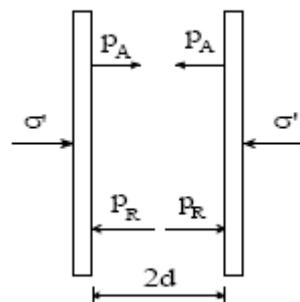


Figure 4.2.1 : Forces agissant sur deux particules argileuses (d'après Tran Ngoc Lan, 1987)

Dans la gamme de pressions mesurées habituellement en géotechnique, Sridharan et Jayadeva (1982) ont constaté que la pression due aux forces d'attraction de Van der Waals était négligeable devant la pression osmotique de répulsion pour des matériaux argileux tels que la kaolinite ou la montmorillonite.

Dans ces conditions, le mécanisme de gonflement s'explique de la façon suivante :

Si la contrainte effective baisse, l'équilibre ne peut être assuré que par une diminution de la pression osmotique de répulsion, c'est-à-dire que, pour une composition minéralogique du sol et une composition du liquide interstitiel données, des molécules d'eau pénètrent dans l'espace interparticulaire avec pour effet de diminuer la concentration cationique de la double couche, donc la pression osmotique, jusqu'à ce que cette dernière équilibre de nouveau la contrainte effective. Il en résulte alors un écartement des deux particules se traduisant au niveau macroscopique par le gonflement des argiles, et entraînant par ailleurs une légère diminution de la force de corrélation. Ainsi, une diminution de contrainte effective se traduit au niveau macroscopique par le gonflement des argiles.

Inversement, si la contrainte effective augmente, l'équilibre ne peut être assuré que par une augmentation de la pression osmotique de répulsion. Pour une concentration du liquide interstitiel donnée, ceci ne peut être possible que si la concentration dans la double couche augmente. Ce n'est possible que si la distance $2d$ est réduite, donc ceci se traduit macroscopiquement par un tassement des argiles.

Ainsi, une variation de la contrainte effective peut être à l'origine du gonflement ou de la compression des argiles. Plusieurs auteurs (Bolt, 1956 ; Mitchell, 1993 ; Sharma, 1998) ont mis en évidence une relation entre la distance d et la contrainte effective (Figure 4.2.2).

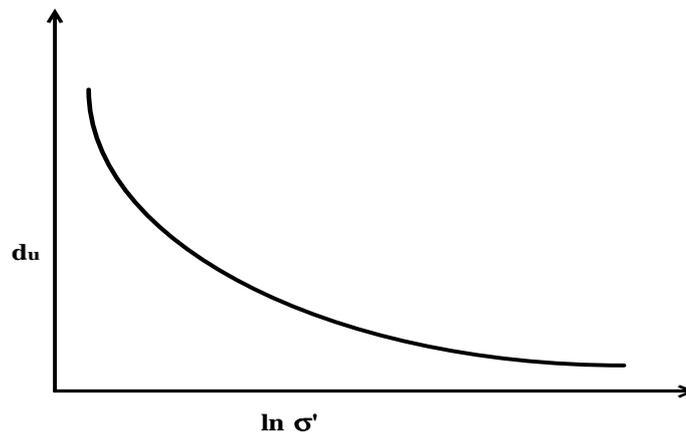


Figure 4.2.2 : Relation entre $du=2d$ et contrainte effective (d'après Sharma, 1998)

En résumé, dans le gonflement des argiles saturées, la pression osmotique joue un rôle prépondérant. La théorie de la double couche fournit une interprétation intéressante des phénomènes physico-chimiques sur le plan qualitatif mais il faut rester prudent pour appliquer quantitativement cette théorie à un sol argileux car les hypothèses utilisées ne correspondent pas toujours aux caractéristiques du terrain naturel.

4.2.2 Equilibre d'une particule argileuse dans un milieu non saturé

Lorsque les argiles ne sont plus saturées, par suite d'une dessiccation par exemple, d'autres forces deviennent prépondérantes dans l'hydratation des argiles, notamment : les forces d'attraction dues aux charges électriques, les forces de Van der Waals de tension capillaire et les forces dérivant de l'énergie d'hydratation des cations échangeables (Tran Ngoc Lan, 1987). L'ensemble de ces forces constitue la force de succion qui agit directement sur les molécules d'eau polaires.

Sharma (1998) a démontré l'effet de la succion ou des conditions non saturées sur le comportement des argiles à l'échelle du feuillet en partant du concept de la double couche (Bolt, 1956).

Supposons deux feuillets carrés de côté L et dont une partie de l'espace interfoliaire est occupée par l'air (Figure 4.2.3)

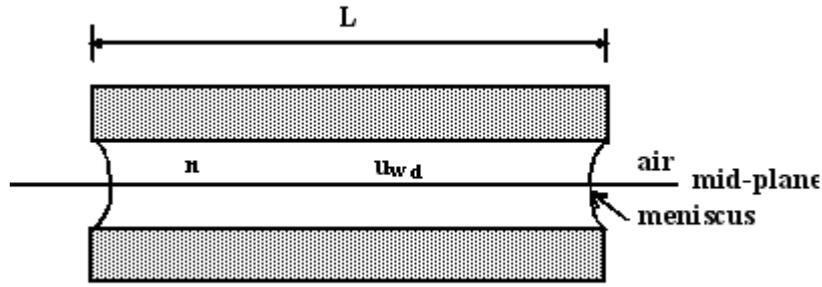


Figure 4.2.3 : Double couche diffuse dans un environnement non saturé (Sharma , 1998)

Considérons une fraction $4\omega L$ de la longueur totale $4L$ dont les vides sont occupés par de l'eau à une pression u_w , et une longueur $4(1-\omega)L$ dont les vides sont remplis d'air à une pression u_a . Le paramètre ω varie entre 0 (totalité des vides contenant de l'air) et 1 (vides totalement saturés).

Si on considère que les forces agissant sur l'unité de surface du feuillet et sur le plan médian de la double couche entre les feuillets sont à l'équilibre et que la force électrostatique est nulle (l'analyse est faite dans la région comprise entre le plan médian de la particule et le plan médian de la double couche) on a :

$$\sigma L^2 = u_{wd}L^2 - 4(1-\omega)LT \quad (I-4)$$

avec

σ : pression externe agissant sur le feuillet

u_{wd} : pression interstitielle à égale distance des deux feuillets

$$u_{wd} = u_w + P_{os} \quad (I-5)$$

avec

u_w : pression interstitielle

P_{os} : composante de u_{wd} due à la différence de concentration $C_1 - C_0$

Ta : tension interfaciale eau-air

Donc

$$\sigma = u_{wd} - \frac{4T(1-\omega)}{L} \quad (I-6)$$

En combinant les équations (I-5) et (I-4) on obtient :

$$P_{os} = \sigma - u_w + \frac{4T(1-\omega)}{L} \quad (I-7)$$

Cette équation peut s'exprimer de la façon suivante

$$P_{os} = \sigma - u_a + (u_a - u_w) + \frac{4T(1-\omega)}{L} \quad (I-8)$$

Selon les équations (I-7) et (I-8), si $(\sigma - u_a)$ reste constant et si une imbibition se produit, P_{os} diminue car la succion et le terme dépendant de la tension interfaciale $[4T(1-\omega)/L]$ diminuent. Autrement dit, la diminution de P_{os} est due à un transfert de l'eau vers la zone de la double

couche ou l'espace interfoliaire, entraînant une diminution de la concentration ionique C_1 dans la zone de la double couche. Cela entraîne donc une augmentation de la distance interfoliaire et ainsi un gonflement macroscopique. La diminution de P_{os} due à $[4T(1-\omega)/L]$ peut être significative.

4.3 Gonflement au sens mécanique

D'un point de vue mécanique, le phénomène de retrait-gonflement est le résultat d'une redistribution/modification d'état de contraintes au sein du matériau en présence d'eau. Ainsi, il est possible en utilisant la relation de Terzaghi : $\sigma = \sigma' + u$ de définir les états de contrainte d'un sol normalement consolidé à l'équilibre. Pour un élément de sol saturé déformable, à l'équilibre sous une contrainte totale σ_0 , en condition de drainage ($u = 0$), cette relation s'exprime par :

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sigma_0 \\ u &= 0\end{aligned}$$

avec

$$\begin{array}{ll}\sigma', \sigma_0 & \text{respectivement contrainte effective et contrainte totale} \\ u & \text{pression interstitielle}\end{array}$$

Si la contrainte totale σ_0 est supprimée, sans apport d'eau, on obtient instantanément :

$$\begin{aligned}u &= -\sigma_0 \\ \sigma' &= \sigma_0\end{aligned}$$

La pression interstitielle devient négative et égale à l'opposé de la variation de la contrainte totale. Le sol est en état de succion.

On définit la succion par :

$$s = u_a - u_w$$

avec :

$$\begin{array}{l}u_a : \text{pression d'air} \\ u_w : \text{pression interstitielle}\end{array}$$

A partir de ce nouvel équilibre, tout apport d'eau va entraîner une augmentation de la pression interstitielle qui va tendre vers zéro. Cette augmentation de la pression interstitielle s'exprime par un gonflement, lorsque l'échantillon a la possibilité de changer de volume ($u = 0$, $\sigma' = 0$), ou par le développement d'une pression de gonflement dans le cas contraire. Dans ce dernier cas, le contact avec une eau libre fait tendre la pression interstitielle vers zéro, et l'équilibre est alors atteint pour :

$$u_f = 0 \text{ et } \sigma_f = \sigma'_f$$

On a alors :

$$\begin{aligned}\Delta\sigma &= \sigma_f - 0 = \sigma_f \\ \Delta u &= 0 - (-\sigma_0) = \sigma_0 \\ \Delta\sigma' &= \sigma'_f - \sigma_0 \\ \Delta\sigma &= \Delta u + \Delta\sigma' = \sigma'_f \\ P_s &= \sigma'_f = \sigma_f\end{aligned}$$

avec: P_s pression de gonflement

Ainsi, si on met un sol déformable en contact avec une eau libre et si on empêche les variations de volume, le sol exerce une pression de gonflement sur le système qui tend à le contraindre. Cette pression de gonflement est égale à la variation de pression interstitielle entre les états d'équilibre avant et après contact avec l'eau libre. Ainsi, à un incrément de pression de l'eau, il correspond un incrément de pression de gonflement.

Toutefois, d'un point de vue strictement mécanique l'extension du concept de contrainte effective (ou contrainte de contact inter-granulaire) aux cas des argiles gonflantes nécessite de redéfinir le terme « contact inter-granulaire » afin de prendre en compte la présence des couches d'eau adsorbées (dont les propriétés sont celles d'un solide) autour des minéraux argileux.

Ainsi, plusieurs définitions de la contrainte effective, dans le cas d'un sol gonflant, ont été établies par différents auteurs (Lambe & Whitman 1969 ; d'après Yahia-Aissa 1999 ; Sridharan & Venkatappa-Rao 1973 ; Mitchell, 1993). Ils ont proposé, pour la contrainte agissant à la surface d'une particule argileuse, une relation de ce type :

$$\sigma = \sigma' + (R - A) + u$$

avec

σ : contrainte totale

σ' : contrainte interparticulaire

R : contrainte due aux forces de répulsion entre les particules

A : contrainte due aux forces d'attraction entre les particules

u : pression de l'eau interstitielle (dans les pores)

Comme on l'a vu antérieurement, les forces de répulsion sont dues aux phénomènes osmotiques engendrés par l'existence de la double couche diffuse et l'attraction interparticulaire est due aux forces électriques et de Van der Waals. L'utilisation de cette relation reste délicate en raison de la mauvaise connaissance des mécanismes se produisant à l'échelle microscopique. Cependant, cette relation souligne le fait que, lors d'une modification de la contrainte totale appliquée, ce n'est pas seulement la variation de la pression interstitielle qui est responsable du gonflement, mais aussi la redistribution des forces attractive et répulsive.

Phénomène de retrait-gonflement des sols argileux dû à la modification de pressions interstitielles négatives (état de succion du sol)

Un changement dans l'environnement hydrique d'un sol conduit à une modification des pressions interstitielles régnant en son sein. Ces modifications entraînent dans les sols non saturés, une modification de la valeur de succion ($s = u_a - u_w$) et donc de la contrainte effective (σ'), cette dernière étant liée à la contrainte totale σ , à la pression d'air u_a et à la pression de l'eau u_w qui règnent dans les interstices entre les particules par la relation (Bishop, 1959 d'après Delage et Cui, 2000) :

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

Selon cette équation, une augmentation de pression interstitielle ou une réduction de la succion entraîne un relâchement de la contrainte effective, provoquant un gonflement ou une

légère augmentation de l'indice des vides. Autrement dit, quand une argile gonflante est au contact de l'eau, la diminution de succion entraîne une augmentation de l'énergie de l'eau (l'eau libre dans un sol saturé est dans un état d'énergie maximum). Cette augmentation d'énergie correspond à une augmentation de pression interstitielle qui est de nature répulsive (Cui et al., 2002). L'effet de cette pression sur le changement de volume du sol dépend cependant de la contrainte externe appliquée au sol (Cui et al, 2002). Si la contrainte externe est inférieure à cette pression, la différence se dissipe en entraînant un écartement des particules ou agrégats argileux et donc un gonflement macroscopique. A l'inverse, si la contrainte externe est supérieure, la pression répulsive demeure et aucun gonflement macroscopique ne se produit.

En revanche, lors d'une diminution de la pression interstitielle, une augmentation de succion se produit, entraînant une augmentation de la contrainte effective. Il en résulte une diminution du volume du sol (retrait) qui peut se traduire en surface par un tassement. Dans les sols fins, tant que le sol reste saturé, cette diminution de volume équivaut au volume d'eau extrait (Bigot et Zerhouni, 2000).

Une augmentation de succion du sol peut être provoquée par tous les phénomènes conduisant à une diminution de la teneur en eau du sol, telle qu'une dessiccation due à la sécheresse : évaporation de surface, baisse du niveau de la nappe phréatique, succion de l'eau du sol par les végétaux, etc.. Dans le cas de la dessiccation, l'augmentation de succion est généralement concentrée dans la partie superficielle du sol et conduit à un retrait, parfois accompagné de fissuration (Bigot et Zerhouni, 2000).

4.4 Aspect Phénoménologiques du gonflement

4.4.1 Cinétique de gonflement

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique. La cinétique du gonflement, c'est-à-dire la relation existant entre la déformation et le temps, est en générale très lente et dépend de la nature et de l'état du sol et du niveau de chargement (Serratrice et Soyez, 1996).

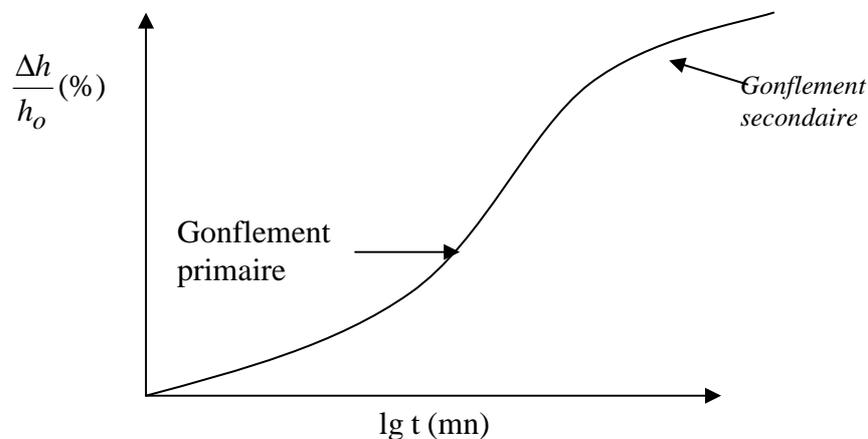


Figure 4.4.1 : Courbe de gonflement en fonction du temps

Sur la courbe du gonflement en fonction du logarithme du temps (Figure 4.4.1), obtenue, soit lors d'un essai de gonflement libre, soit lors d'un palier de déchargement, il est possible de distinguer deux phases de déformations : un gonflement primaire et un gonflement secondaire (Parcevaux, 1980 ; Alonso et al, 1989, 1991 ; Serratrice et Soyez, 1996).

La première phase est relativement « rapide » en comparaison avec la seconde et est liée au processus de diffusion ou de migration de l'eau dans les pores de l'éprouvette (Alonso et al 1989, 1991 ; Serratrice et Soyez, 1996). Autrement dit, le gonflement primaire est dû à la dissipation de la succion dans les macropores du sol. Il est contrôlé par le gradient de charge hydraulique et la perméabilité du sol. Il dépend de la nature du matériau, de son état de saturation, de l'état de contrainte, de la procédure d'imbibition (par une face seulement ou par les deux faces). La cinétique est plus ou moins lente et dure de quelques heures à quelques jours (Serratrice et Soyez, 1996).

La phase de gonflement secondaire est liée à l'hydratation progressive des minéraux argileux, elle correspond à un processus de cinétique lente d'après Alonso et al., (1989, 1991). En partant de ces interprétations des phases de gonflement, ces mêmes auteurs ont proposé un modèle de l'évolution du gonflement en fonction du temps.

Par ailleurs, d'autres auteurs (Dakshanamurthy 1978 ; Vayssade, 1978 ; Parcevaux, 1980 ; Sridharan et al., 1986 ; Abdullah et al., 1999), analysant le phénomène d'un point de vue empirique, ont proposé à partir d'essais de laboratoire une loi hyperbolique entre le taux de gonflement d'un échantillon d'épaisseur, h_o , et le temps t , de la forme :

$$\varepsilon_v = \frac{t}{a + bt}$$

où ε_v désigne la déformation verticale, a et b deux constantes.

La relation proposée par Parcevaux (1980) est

$$\frac{\Delta h}{h_o} = G \frac{t}{B + t}$$

avec :

- G taux de gonflement final $(\Delta h/h_o)_f$, obtenu pour un temps infini ;
- B temps de demi-gonflement par rapport au gonflement final.

Les paramètres G et B peuvent être déterminés graphiquement dans le système de coordonnées $[t, t/(\Delta h/h_o)]$, et correspondent respectivement à l'inverse de la pente et au produit de G par l'ordonnée à l'origine.

Parcevaux (1980) a montré que :

- G et B étaient influencés par les contraintes initiale et finale appliquées au sol ;
- G oscille autour d'une valeur moyenne pour un type de sol donné, sous un état de contrainte fixe ;
- B peut être considéré comme proportionnel à l'épaisseur h_o de l'échantillon.

De plus, les résultats obtenus par Parcevaux (1980) sur la propagation du gonflement mettent en évidence que

- la loi hyperbolique est aussi applicable sur chaque élément d'un échantillon divisé en tranche. Chacune d'entre elles se comportant comme un échantillon complet ;
- avec une alimentation en eau uniquement par le haut, le phénomène de gonflement se propage dans les couches inférieures avant sa réalisation complète dans les couches supérieures en raison de l'existence de succions différentielles ;
- au bout d'un temps suffisamment grand, le taux de gonflement tend vers une valeur unique en tout point de l'échantillon si l'épaisseur de celui-ci est suffisamment faible pour que l'influence de la contrainte géostatique demeure négligeable.

4.4.2 Evolution de la pression de gonflement

L'évolution de la pression de gonflement au cours de l'humidification a été étudiée par différents auteurs. En travaillant sur des argiles gonflantes compactées et humidifiées à volume constant, Brackley (1983) et Pusch (1982) constatent que la pression de gonflement passe par un maximum avant de décroître au cours de l'hydratation. Des essais à succion contrôlée effectués par Romero (2001) sur des échantillons d'argile de Boom compactée, ont donné des résultats similaires (Figure 4.4.2).

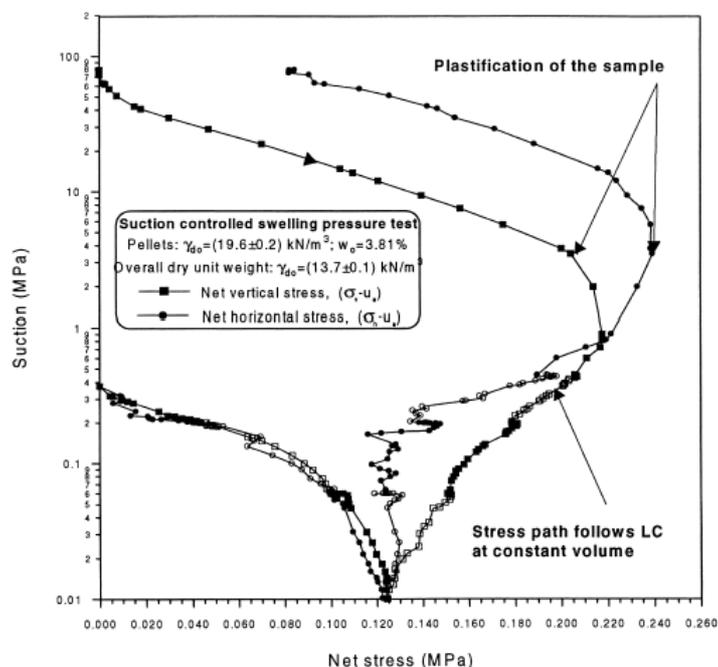


Figure 4.4.2 : Evolution de la pression de gonflement au cours de l'humidification (Alonso et al. 1999)

Alonso et al. (1999) expliquent ce phénomène par une plastification du matériau au cours de l'hydratation. Parallèlement à la diminution de succion et à l'augmentation de la pression de gonflement, la résistance entre les agrégats du sol diminue. A partir d'un certain seuil, les amas de particules s'effondrent, provoquant la baisse de la pression de gonflement.

L'évolution typique de la pression de gonflement des échantillons de bentonite compactés hydratés en condition confinée est présentée sur la Figure 4.4.3 (Cho et al. 2000). Après la mise en contact de l'échantillon avec de l'eau, la pression de gonflement a augmenté rapidement dans un premier temps et a atteint une valeur constante au bout de 15 jours. Avec

l'échantillon de densité sèche égale à 16 kN.m^{-3} , la pression de gonflement a atteint d'abord une valeur de 6 MPa, elle a ensuite baissé, puis remontée et s'est enfin stabilisée à une valeur de 4,62 MPa. Ce type de comportement de double pic a été aussi observé par Pusch (1982) et Komine & Ogata (1994) sur des bentonites compactées respectivement à $17,5 \text{ kN.m}^{-3}$ et $17,9 \text{ kN.m}^{-3}$ respectivement.

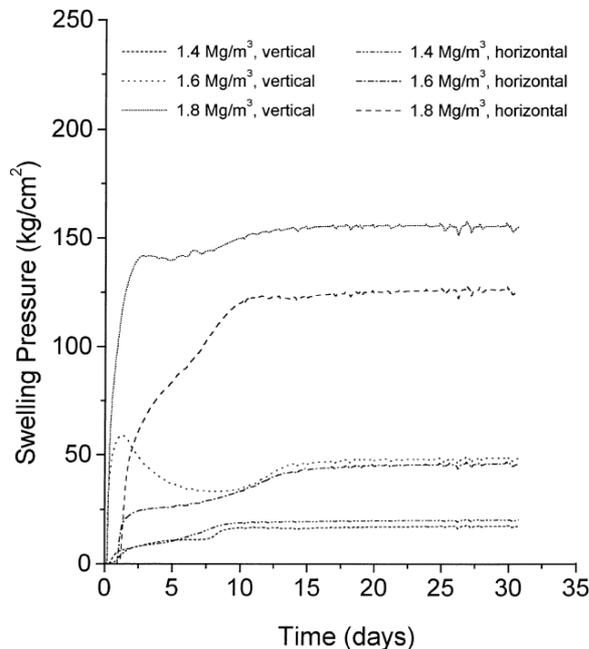


Figure 4.4.3 : Evolution typique des pressions de gonflement d'une bentonite compactée à différentes densités initiales (Cho et al. 2000)

Ce phénomène pourrait être expliqué par le changement structural de l'argile au cours de l'hydratation. Les observations microstructurales des bentonites fortement compactées à l'état sec réalisées par Marcial (2003) ont montré un système de double porosité dans ces échantillons. Il existe deux types de pores : i) les micro-pores (intra-agrégats) de diamètre de l'ordre de $0,02 \mu\text{m}$; ii) les macro-pores (inter-agrégats) de diamètre de l'ordre de $2 \mu\text{m}$. Lorsque les agrégats du sol adsorbent l'eau à l'état sec, l'eau entre d'abord dans les micro-pores et ainsi écarte les feuillets. Les agrégats, composés de particules, gonflent ensuite. Comme les feuillets sont écartés, la force d'attraction entre eux est affaiblie, ils se détachent alors des agrégats et se localisent plus facilement dans les macro-pores. Cette exfoliation diminue la résistance au cisaillement entre les agrégats. A l'état de gonflement empêché, lorsque la pression de gonflement atteint une certaine valeur, les forces tangentielles aux contacts entre les agrégats dépassent cette valeur, entraînant une réorganisation de la structure par glissement grains sur grains. Cette réorganisation a pour conséquence une diminution de la pression de gonflement. Dans le cas des échantillons à 16 kN.m^{-3} de masse volumique, cette diminution est prépondérante au début. Lorsque les macro-pores sont comblés, l'effet de la réorganisation s'amenuise et la pression de gonflement augmente à nouveau. Cette explication s'adapte aussi aux résultats des autres échantillons bien que les deux pics ne soient pas aussi distincts. Dans le cas de l'échantillon à 18 kN.m^{-3} de masse volumique, le volume des macro-pores est plus faible, l'effet de la réorganisation structurale est ainsi réduit, alors que pour l'échantillon à 14 kN.m^{-3} de masse volumique, la pression de gonflement est insuffisante pour provoquer la réorganisation de la structure du sol.

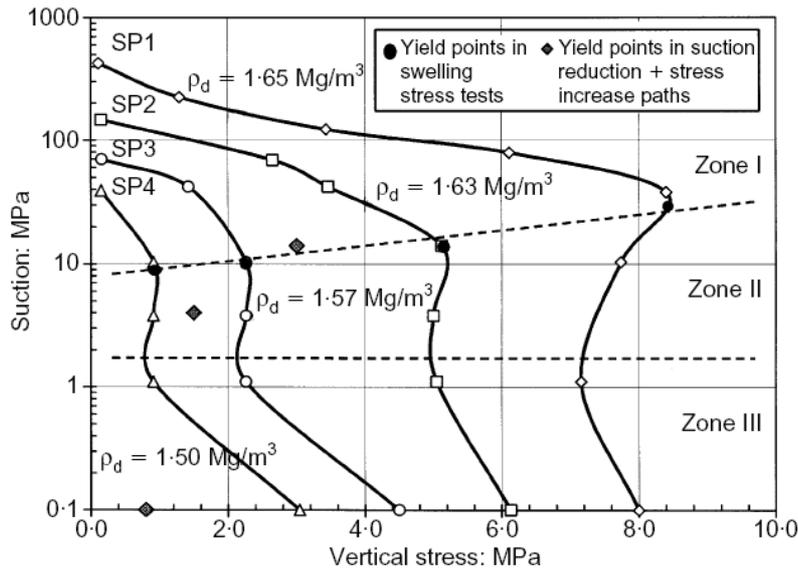


Figure 4.4.4 : Contraintes généralisées observées dans les essais de pression de gonflement (Lloret et al. 2003).

Dans la Figure 4.4.4 sont présentés les résultats des pressions de gonflement à volume constant en fonction de la succion, obtenus sur des essais à succion contrôlée par Lloret et al. (2003). Trois zones peuvent être distinguées. Dans la première zone correspondant à de fortes succions et des basses pressions, la contrainte verticale est inférieure à la pression de préconsolidation. Elle est générée pour compenser le gonflement des agrégats dû à la diminution de la succion. Dans la deuxième zone, lorsque la pression de préconsolidation est atteinte, l'effondrement des macro-pores se produit. Il est compensé par une légère diminution de la contrainte verticale. Dans la troisième zone, correspondant à de faibles succions, le gonflement des agrégats est tellement fort qu'il masque tout effondrement possible, c'est pour cette raison que la contrainte verticale augmente avec la diminution de la succion.

4.5 Mécanisme du retrait

Au cours de la dessiccation, les particules argileuses ont tendance à suivre, en sens inverse, le processus d'humectation. Dans les smectites, en général, la dessiccation provoque un rapprochement des particules et une réduction de leur nombre, par suite du regroupement des particules les plus fines, entraînant ainsi une augmentation du nombre moyen de feuillets par unité. Cependant, la réorganisation de la phase solide dépend fortement des niveaux de succion appliquée. Lorsque la succion augmente fortement, l'eau dans l'espace interfoliaire tend à être éliminée, la distance interfoliaire diminue et le nombre de feuillets par particule augmente. Le départ d'eau progressif provoque ainsi une réduction du volume de la particule argileuse par diminution de la distance interfoliaire. Cette réduction du volume des particules argileuses produit une contraction macroscopique du matériau : c'est *le phénomène de retrait*.

A l'échelle macroscopique, lors de la déshydratation des sols argileux, la rétraction des sols commence en surface. La différence de pression qui se développe à travers les interfaces air-eau dans les vides en bordure de l'échantillon, due au départ de l'eau, est responsable du

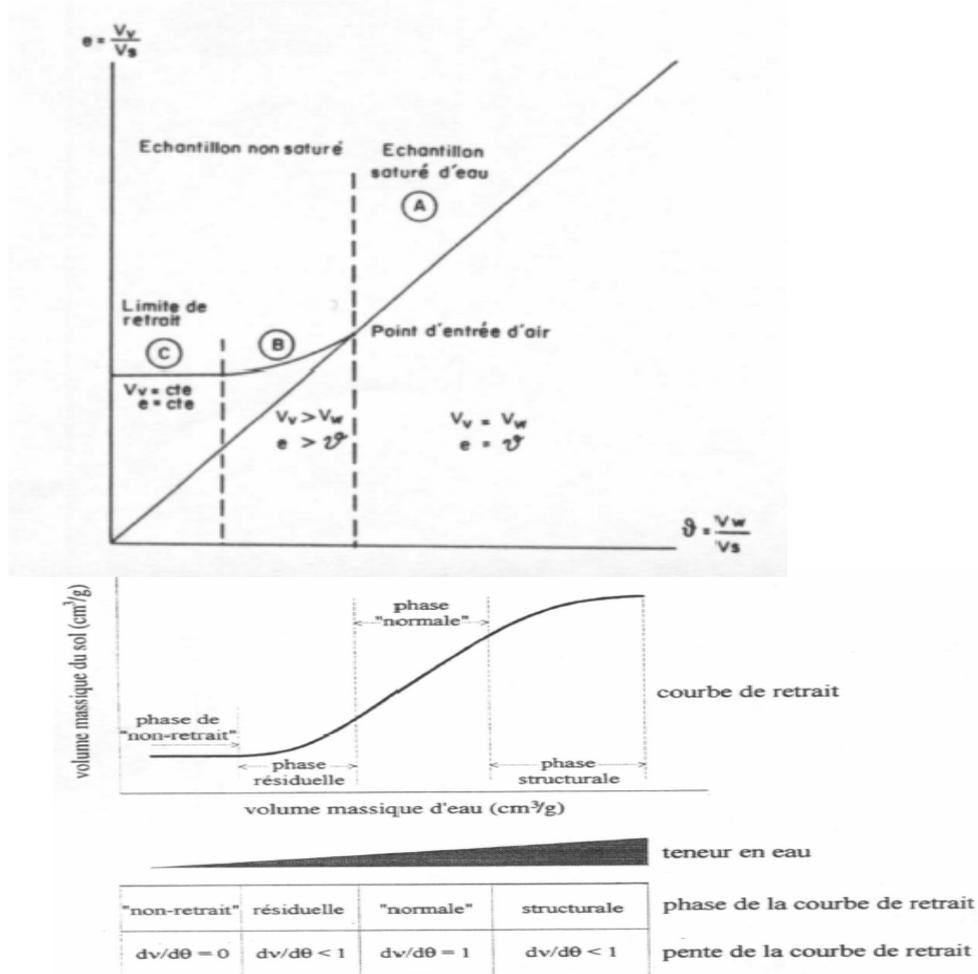


Figure 4.5.1 : Représentation schématique de la courbe de retrait d'une argile (d'après Tessier, 1984 ; Coquet, 1995 d'après Tessier et al, 2006)

phénomène de retrait (Yong et Warkentin, 1975). Ce retrait s'accompagne, bien entendu, de modifications importantes de la structure du sol argileux.

La courbe de retrait qui lie l'indice des vides à la teneur en eau volumique ω ($\omega = V_w/V_s$) permet de caractériser les variations de volume d'un matériau au cours de la dessiccation et ainsi de comprendre le mécanisme de retrait (Figure 4.5.1).

Au début du processus de séchage, le départ de l'eau des macropores se produit sans provoquer de retrait significatif (phase dénommée : *retrait structural*). Cependant, lorsque le processus d'évaporation se poursuit, une interface air-eau se forme dans les vides de surface avec une pression inférieure du côté convexe de l'interface. Cette différence de pression (ou succion), provoque un transfert d'eau de l'intérieur vers la surface du sol (Yong et Warkentin, 1975). Au cours de ce transfert, tant que cette pression est supérieure à la résistance qui oppose les particules à leur rapprochement, le sol se déforme. Au début il se rétracte en restant saturé. La variation de volume est ainsi proportionnelle à la quantité d'eau extraite du sol (Figure 4.5.1). Ce domaine, noté A, où le volume d'eau évaporée est compensé par une égale diminution du volume des vides internes, est appelé *retrait normal* (Yong et Warkentin, 1975; Sitharam et al., 1995). Il correspond ainsi au domaine saturé. Cette étape est accompagnée de variations des propriétés mécaniques du sol.

Lorsqu'une part du volume d'eau occupant les vides a été expulsée, l'air pénètre dans le réseau poreux (point d'entrée d'air). La cohésion entre particules devient telle que les forces engendrées par la dessiccation ne sont plus suffisantes pour provoquer une variation significative du volume de l'échantillon, d'autant plus que l'indice des vides du sol a déjà beaucoup diminué. Le sol se dessèche, l'eau qu'il contient ne présente plus une structure continue, mais se localise aux points de contact entre grains solides. La limite supérieure de ce domaine, noté B, est appelée point d'entrée d'air et correspond à la limite de saturation. Toutefois, si la teneur en eau continue à décroître, la diminution du volume ou retrait se poursuit, à cause d'une réorganisation de la matrice argileuse, avec dans certains cas flexion des particules, mais avec une amplitude qui devient de plus en plus faible et n'est plus proportionnelle à la variation de teneur en eau, jusqu'à devenir quasiment nulle. Ce domaine B est appelé domaine de *retrait résiduel*. Selon Yong et Warkentin (1975), la résistance au retrait est liée à l'interaction entre particules ou entre leurs couches d'hydratation, et à la répulsion interparticulaire due aux forces responsables du gonflement. Le troisième domaine, noté C, commence à la limite de retrait : les points de contact entre particules sont maximum, le volume ne varie plus malgré le départ de l'eau.

Par ailleurs, Yong et Warkentin (1975) et Stirk (1953, d'après Sitharam et al., 1995) ont noté que si un sol argileux contient une large gamme de tailles de pores, due à l'agrégation des particules et/ou à la présence de particules plus grossières, l'air peut entrer dans le sol dès le début du séchage et dans ce cas la variation de volume du sol ne peut pas être proportionnelle à la quantité d'eau extraite.

La limite de retrait d'un sol correspond, en pratique, à la teneur en eau pour laquelle le sol commence à se désaturer. Au dessus de la limite de retrait, la déformation volumique est fonction linéaire de la teneur en eau. Cette linéarité est en général bien établie, quel que soit le sol (Sitharam et al., 1995 ; Delage et Cui, 2000). Les expériences menées par Sitharam et

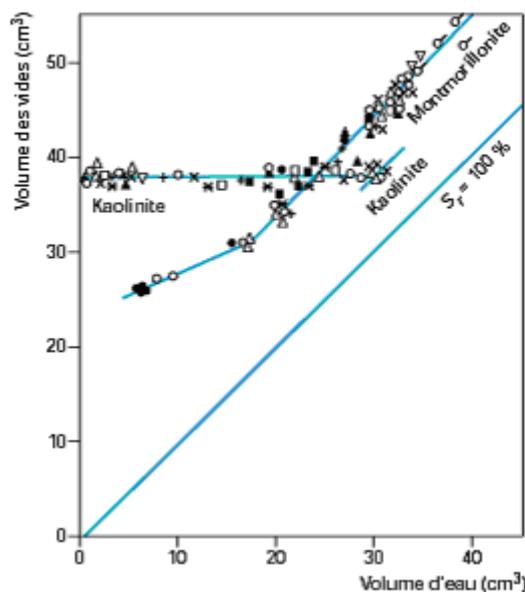


Figure 4.5.2 : Relation entre le volume des vides et le volume d'eau contenue dans deux argiles (d'après Delage et Cui, 2000)

al. (1995) sur quatre sols de plasticité et de densité très différentes ont bien confirmé cette linéarité. Selon ces mêmes auteurs, le retrait volumique ($\Delta V/V_s$) est plus élevé pour les sols composés de montmorillonites (jusqu'à 75 %) que ceux composés de kaolinites (limité à 3 %) (Figure 4.5.2). De plus, le chemin de retrait est indépendant de l'environnement (humidité relative et température) dans lequel le sol est séché.

Par ailleurs, Audiguier (1979) a montré que la limite de retrait est liée non seulement à la minéralogie, à la granularité mais aussi à l'assemblage textural.

Il est assez délicat de relier les trois domaines décrits sur la courbe de retrait à un mécanisme précis d'hydratation des argiles. Néanmoins, il serait assez tentant d'y superposer les trois domaines successifs d'hydratation décrits par Prost (1990) lorsqu'il étudie des courbes de désorption par plusieurs méthodes : hydratation des sites hydrophiles, remplissage des pores par capillarité et phénomène de sorption multicouches. Toutefois, il semble admis que seuls l'hydratation des sites hydrophiles et le phénomène de sorption multicouches soient effectifs dans le processus de gonflement (Prost, 1990). Ainsi, dans le domaine saturé, correspondant aux fortes activités de l'eau, les variations de volume seraient liées à l'adsorption multicouches alors que l'hydratation des sites hydrophiles correspondrait au domaine désaturé.

5 Facteurs influençant le retrait-gonflement des sols argileux

Les propriétés du sol et les conditions environnantes sont des facteurs importants contrôlant le phénomène de retrait - gonflement des sols. En général, les facteurs contrôlant le gonflement contrôlent aussi le retrait des sols mais à différents degrés (Chen et Ma, 1987).

5.1 Facteurs minéralogiques et structuraux

Comme nous avons vu précédemment, à l'échelle microscopique, la nature des argiles joue un rôle déterminant dans le processus de retrait-gonflement des sols. Mais d'autres facteurs, d'ordre structural, sont également importants comme la quantité de minéraux non argileux, l'arrangement des particules entre elles et la présence de toute matière susceptible de les cimenter (Ladd, 1960 ; Yong et Warkentin, 1975 ; Basma et al., 1995 ; Serratrice et Soyez, 1996).

Ainsi, à titre d'exemple illustrant la nature minéralogique d'un sol, les essais de Tabani (1999, d'après Cuisinier, 2002), sur des mélanges limon-bentonite calcique, montrent que le taux de gonflement et la pression de gonflement augmentent respectivement de 6 % à 42 % et de 200 kPa à 700 kPa lorsque le pourcentage massique de bentonite augmente. De plus, Komine et Ogata (1994) et Basma et al. (1995) ont mentionné que la pression de gonflement maximale augmente avec l'augmentation de la fraction argileuse.

Yong & Warkentin (1975), El Sohby et Rabba (1981) ont aussi remarqué que la présence de minéraux non argileux (minéraux inertes vis-à-vis du gonflement) diminue le gonflement et le retrait du sol à cause du phénomène de « dilution ». Selon Wilding et Tessier (1988), la présence de minéraux non argileux augmente la force de friction due aux interactions entre particules et donc entraîne une diminution du phénomène du retrait-gonflement. Selon Audiguier et Delage (1987) l'effet de la présence de particules non argileuses peut s'expliquer de manière microstructurale. Ils ont noté que dans les sols où la quantité de particules non argileuses est suffisante pour que les grains soient en contact direct ou à proximité les uns des autres, ils forment un squelette rigide qui ne subira que peu de rétraction au séchage. Dans le cas contraire, la matrice argileuse englobe les grains et le départ d'eau adsorbée se traduira durant le séchage par une rétraction importante du volume poreux total.

Dans un sol à dominante argileuse l'arrangement initial des particules argileuses ou leur réarrangement pendant le gonflement influence directement l'ampleur du phénomène de gonflement. La pression de gonflement et le gonflement libre sont plus élevés lorsque les particules argileuses sont majoritairement parallèles entre elles (Tran Ngoc Lan, 1987 ; Warkentin, 1962, d'après Serratrice et Soyez, 1996).

Alonso et al (1987) et Delage et Cui (2000) ont noté que les sols à structure matricielle présentent un retrait significatif, alors qu'un sol composé de mottes ou d'agrégats est moins sensible au changement volumétrique lors d'une augmentation de succion.

La cimentation et le vieillissement des sols avant toute action mécanique contribuent aussi à limiter l'ampleur du gonflement. A l'inverse, la déstructuration d'un sol occasionnée soit par des actions mécaniques extérieures, soit par dissolution, peut amplifier le gonflement. Ainsi dans le cas d'une évolution de la structure, la reconduction de la même procédure d'essai sur

le sol après gonflement, ne produira pas les mêmes effets car les propriétés mécaniques et le comportement du sol auront changé (Serratrice et Soyez, 1996).

Par ailleurs, l'influence de la fissuration est notée par Troalen et al. (1984). Ils ont remarqué qu'une part du gonflement peut être absorbée par les vides dans les matériaux naturels fissurés, limitant ainsi le développement complet du gonflement à l'échelle macroscopique.

5.2 Facteurs physique et paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques tels que la teneur en eau et le poids volumique sec, définis à l'échelle macroscopique, jouent aussi un rôle important sur le processus de retrait-gonflement. Ils ont fait l'objet de nombreuses études notamment par Komornik et David (1969), Yevnin et Zaslavsky (1970), Kassif & Ben Shalom (1971), El-Sohby et Rabba (1981), Sridharan et al. (1986), Day (1995), Komine & Ogata (1992, 1994, 1996), Basma et al. (1995), et Guiras-Skandaji, (1996).

Ainsi l'influence de la teneur en eau a été largement discutée. Chen (1973), Brackley (1983), Sridharan et al (1986), Komine & Ogata (1992), soutiennent l'idée que la pression de gonflement est seulement une fonction de la densité sèche initiale (ou de l'indice des vides) du sol et qu'elle est indépendante de la teneur en eau initiale (Figure 5.2.1). Par contre, Komorink & David (1969) et Basma et al (1995) ont noté que la pression de gonflement des sols augmente lorsque la densité sèche initiale augmente et lorsque la teneur en eau initiale diminue. Cependant Komornik & David (1969) n'ont pas trouvé une bonne corrélation entre la pression de gonflement et l'un ou l'autre des deux paramètres considérés séparément.

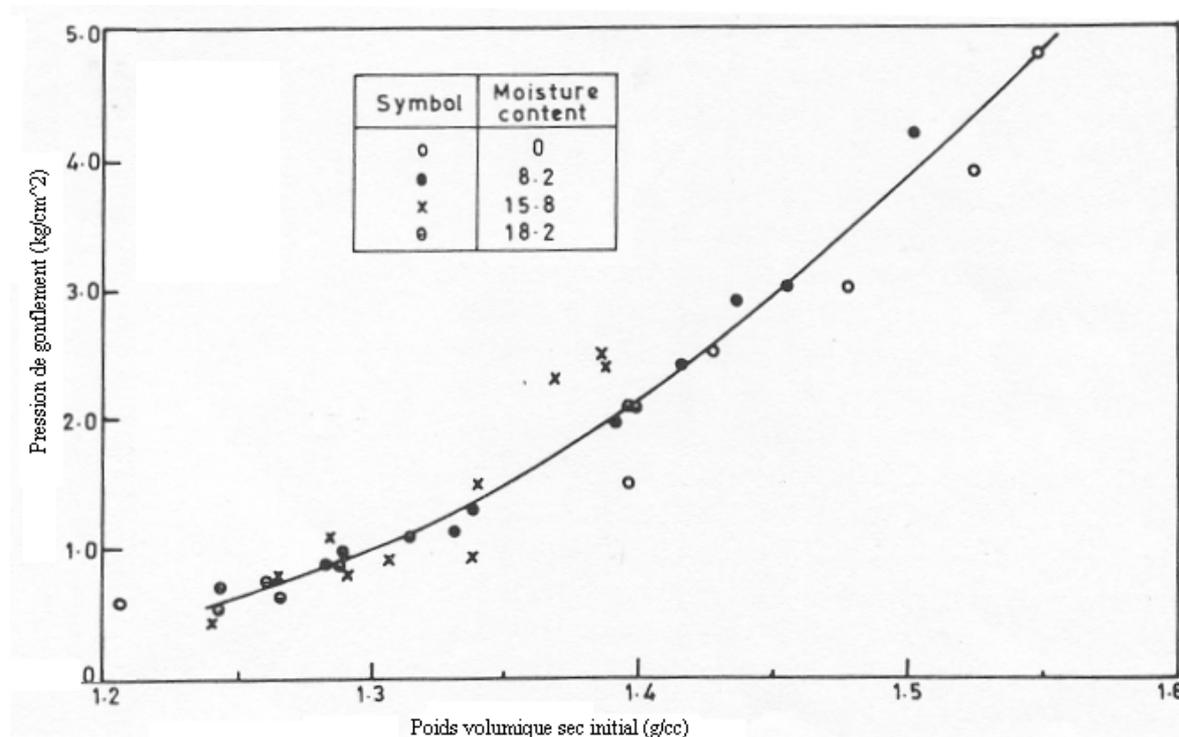


Figure 5.2.1 : Influence de la densité sèche sur le gonflement (d'après Sridharan, 1986)

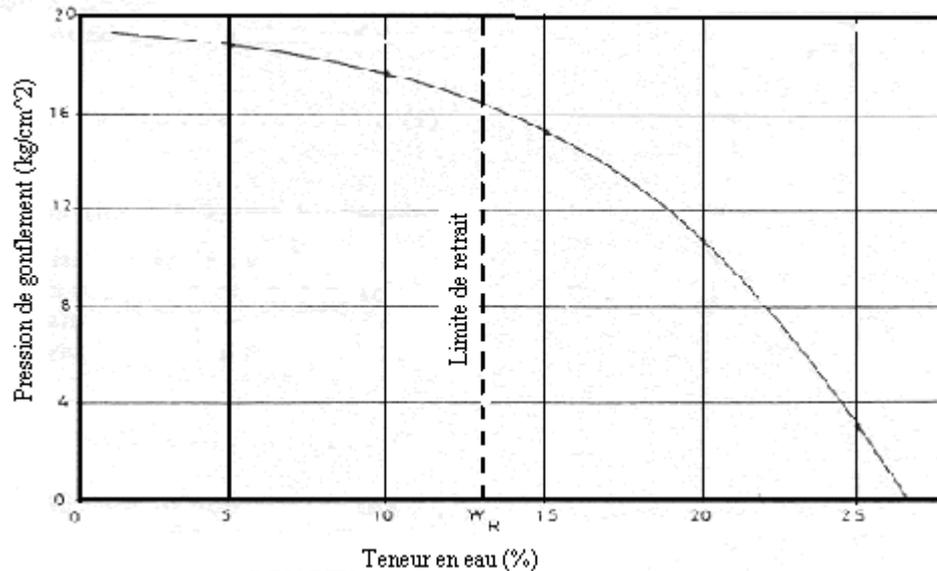


Figure 5.2.2 : Influence de la teneur en eau initiale sur la pression de gonflement (d'après El-Sohby & Rabba, 1981)

Par ailleurs, El-Sohby & Rabba (1981) ont remarqué que l'effet de la teneur en eau initiale sur le taux et la pression de gonflement n'est pas significatif lorsque cette teneur en eau est inférieure à la limite de retrait du sol mais que son effet devient important lorsqu'elle est supérieure (Figure 5.2.2).

D'après Guiras-Skandaji (1996) pour les essais de gonflement libre ou sous différentes charges, le potentiel et la pression de gonflement varient avec la teneur en eau initiale. La teneur en eau initiale des échantillons compactés à la même densité sèche a une forte influence sur les caractéristiques du gonflement. La pression de gonflement augmente lorsque la teneur en eau initiale diminue (Figure 5.2.3). L'évolution du taux de gonflement final en fonction de la teneur en eau initiale est linéaire (Figure 5.2.4).

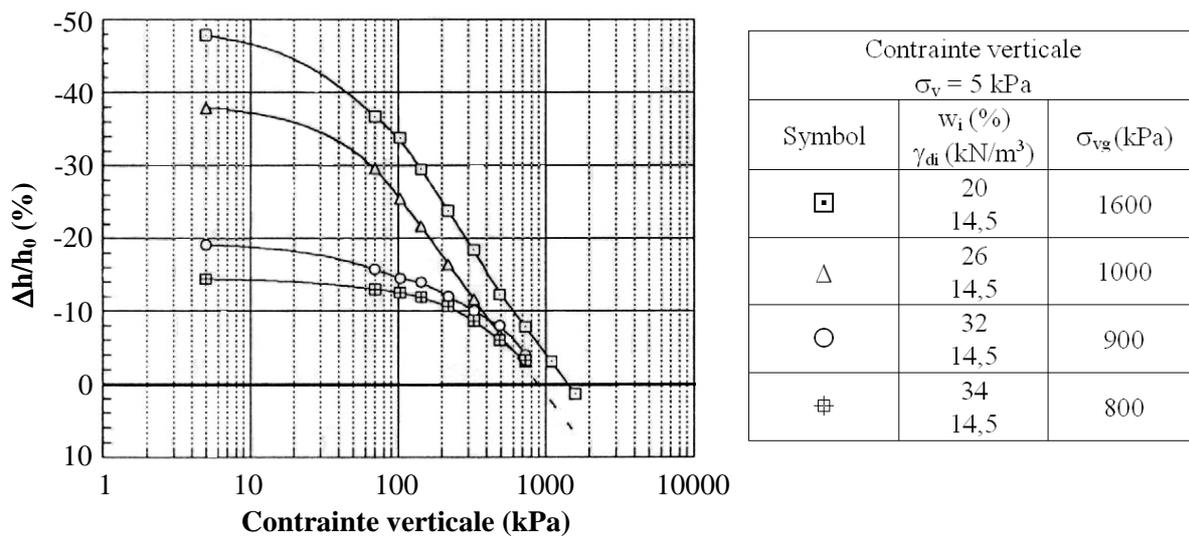


Figure 5.2.3 : Influence de la teneur en eau initiale sur la pression de gonflement mesurée par la méthode de gonflement libre (γ_a moy = 14,5 kN.m⁻³) (Guiras-Skandaji, 1996)

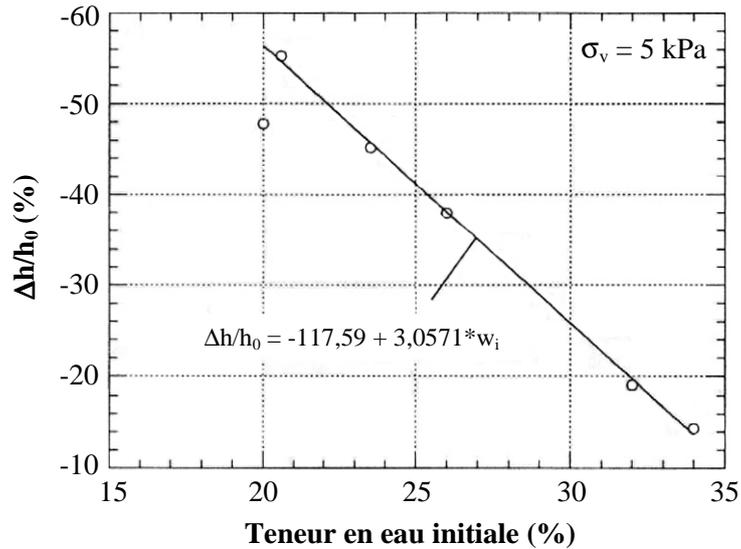


Figure 5.2.4 : Évolution du taux de gonflement final en fonction de la teneur en eau initiale pour la bentonite compactée à γ_d moy = 14,5 kN.m⁻³ (Guiras-Skandaji, 1996)

Komine & Ogata (1992 et 1994), en travaillant sur une bentonite sodique (contenant 48 % de montmorillonite) avec deux poids volumiques secs initiaux, 1,3 et 1,8 kN.m⁻³, montrent qu'à forte densité sèche, le taux de gonflement dépend de la teneur en eau initiale et qu'à faible densité le taux de gonflement est indépendant de la teneur en eau initiale.

Kassif et al (1973 d'après Gens et Alonso, 1992), ont travaillé sur des argiles plastiques compactées à la même densité mais à différentes teneurs en eau initiales, placées dans un moule œdométrique à succion contrôlée. Ils ont montré que le gonflement final dépend fortement de la teneur en eau initiale (ou de la succion).

Cependant, couplé ou non à la teneur en eau initiale, l'effet de la densité sèche initiale sur le taux et la pression de gonflement est bien reconnu. En général, le taux et la pression de gonflement augmentent d'autant plus que la densité sèche initiale est élevée (Figure 5.2.1, Figure 5.2.5).

Les travaux de Komine & Ogata, (1994) ainsi que ceux de Gray et al. (1984), Pusch (1982) et Kanno & Wakamastu (1992) ont montré que la pression de gonflement déterminée par hydratation du matériau confiné augmente de façon exponentielle avec le poids volumique sec initial (Figure 5.2.5). Pour chaque auteur, l'évolution de la pression de gonflement est similaire, avec cependant des amplitudes différentes en fonction du matériau étudié. Cette observation a été confirmée par Sridharan et al. (1986) (Figure 5.2.1), Guiras-Skandaji (1996) et Dixon et al. (1996). Ces derniers ont établi, à partir de 5 argiles fortement plastiques, différentes lois exponentielles entre la masse volumique sèche et la pression de gonflement. Cependant, ces lois sont fonction de l'activité du matériau (Figure 5.2.5 b).

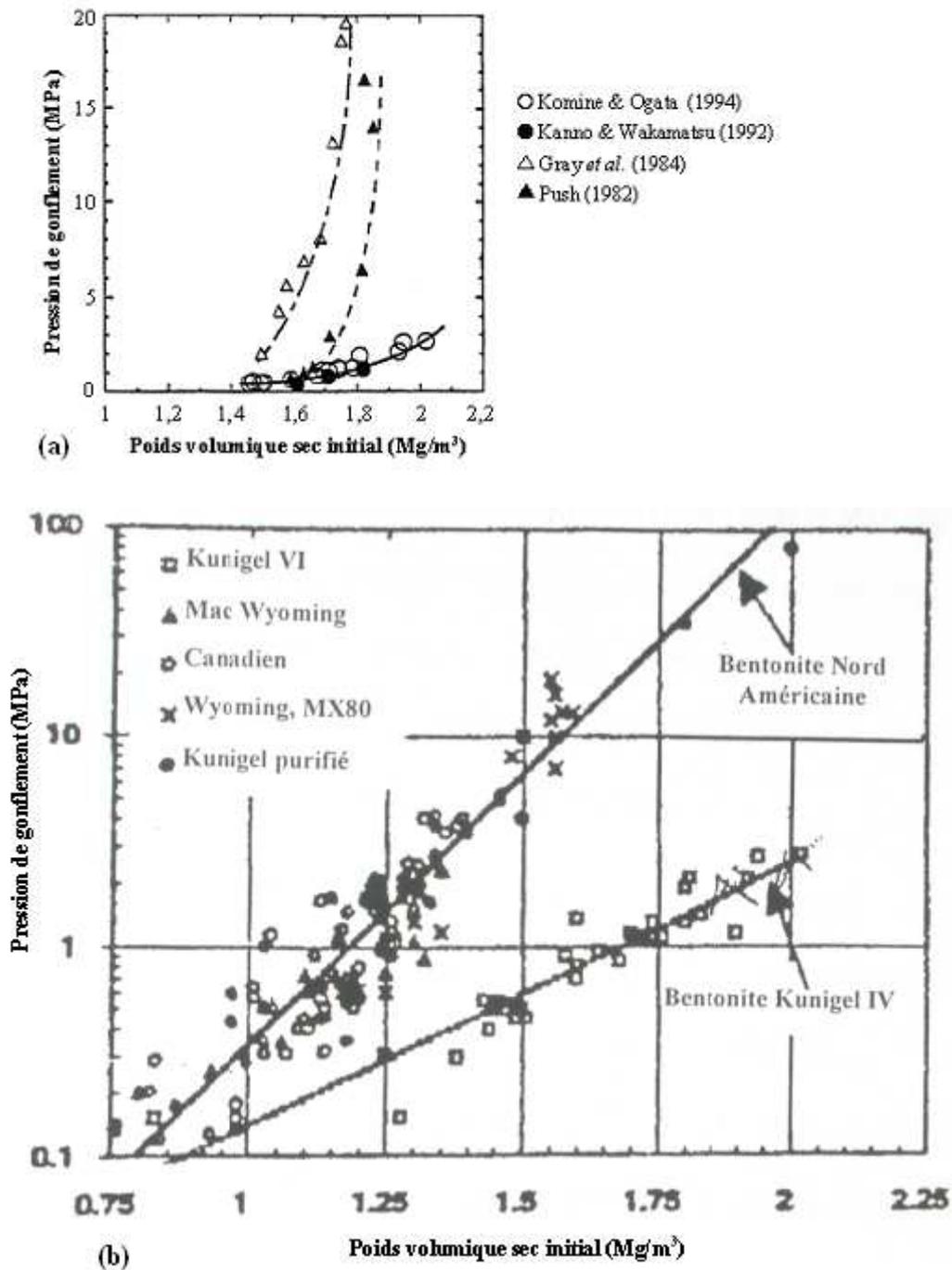


Figure 5.2.5 : Influence de la densité sèche initiale sur la pression de gonflement a) d'après Komine et Ogata, 1994, et b) d'après Dixon et al. 1996

Xu et al. (2003), en travaillant sur une bentonite de Tsukinuno (Japon), ont montré que la pression de gonflement augmente linéairement avec le poids volumique sec initial (Figure 5.2.6). Sur cette figure, nous remarquons aussi que la pression de gonflement augmente avec l'augmentation du pourcentage de bentonite (C_b). De plus, pour des pourcentages de bentonite élevés, l'augmentation de la pression de gonflement avec le poids volumique sec initial est plus rapide. La pente de la courbe (pression de gonflement, poids volumique sec initial), pour l'échantillon contenant 100 % de bentonite, est la plus grande (Figure 5.2.6).

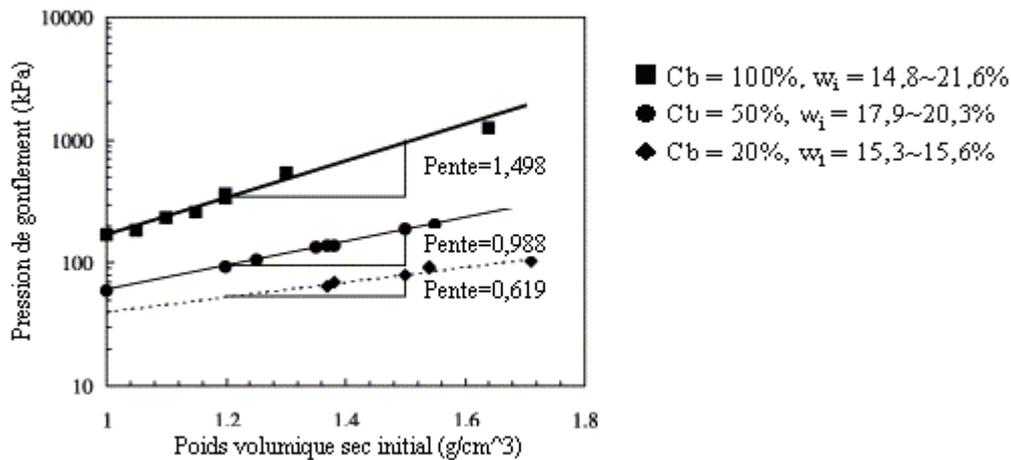


Figure 5.2.6 : Influence de la densité sèche initiale et du pourcentage de bentonite sur la pression de gonflement (Xu et al., 2003)

La Figure 5.2.7 montre les variations de la pression de gonflement de l'argile MX80 en fonction de l'indice des vides de compactage, déterminées par Börgesson et al. (1996). La pression de gonflement diminue d'autant plus que l'indice des vides du sol baisse.

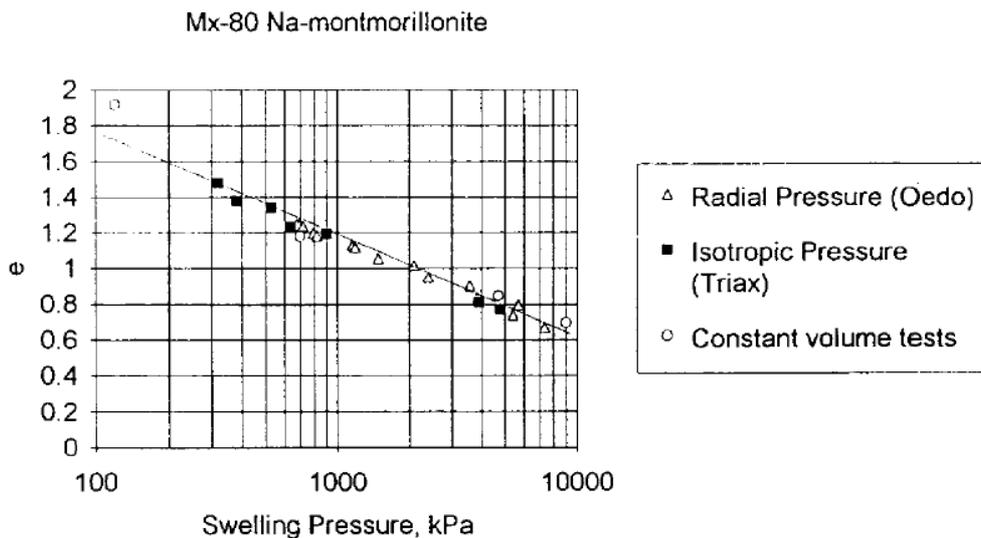


Figure 5.2.7 : Pression de gonflement en fonction de l'indice des vides de l'argile MX-80 (Börgesson et al., 1996)

De plus, Kassif & Ben Shalom (1971) ont remarqué que les échantillons denses montrent une tendance au gonflement même après avoir atteint la saturation totale tandis que les échantillons lâches atteignent le maximum de gonflement avant la saturation totale. Ceci s'explique par le fait que les forces de répulsion sont plus grandes pour un état compact que pour un état lâche. Dans ce dernier cas les forces de répulsion, faibles, peuvent être contrebalancées par la cohésion résiduelle (forces d'attraction) et les contraintes extérieures (Kassif & Ben Shalom, 1971).

Komine & Ogata (2003) ont étudié l'effet de la densité sèche initiale et de la contrainte sur le gonflement à partir d'échantillons d'argile de Kunigel-V1 ou de mélanges sable/argile compactés. Ces échantillons sont hydratés sous une charge verticale constante. La Figure 5.2.8 présente la relation entre le gonflement et la pression verticale, le gonflement diminue

rapidement lorsque la pression verticale augmente. L'effet de la densité sèche initiale de l'échantillon sur le gonflement est présenté dans la Figure 5.2.9, plus l'échantillon est dense, plus le gonflement est important ce qui corrobore les études présentées précédemment.

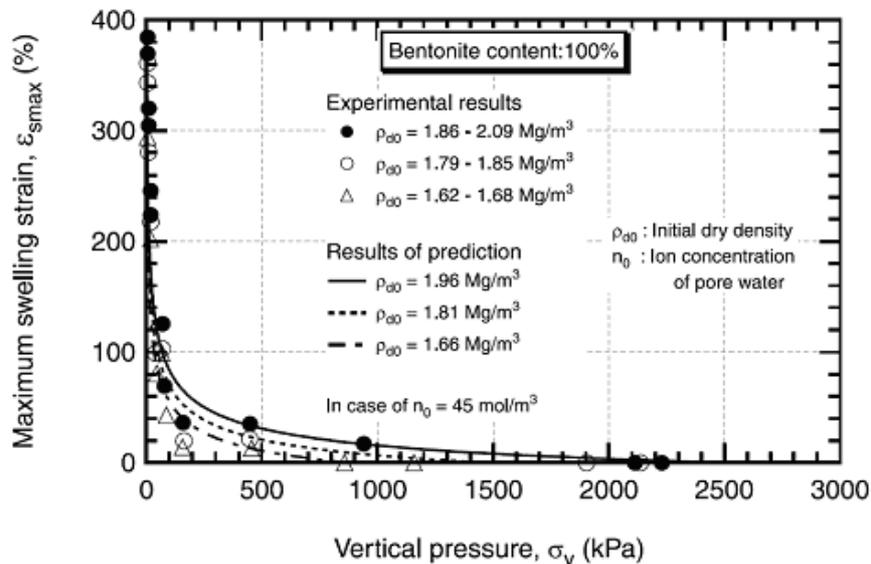


Figure 5.2.8 : Relation entre le gonflement maximal et la pression verticale (Komine & Ogata 2003)

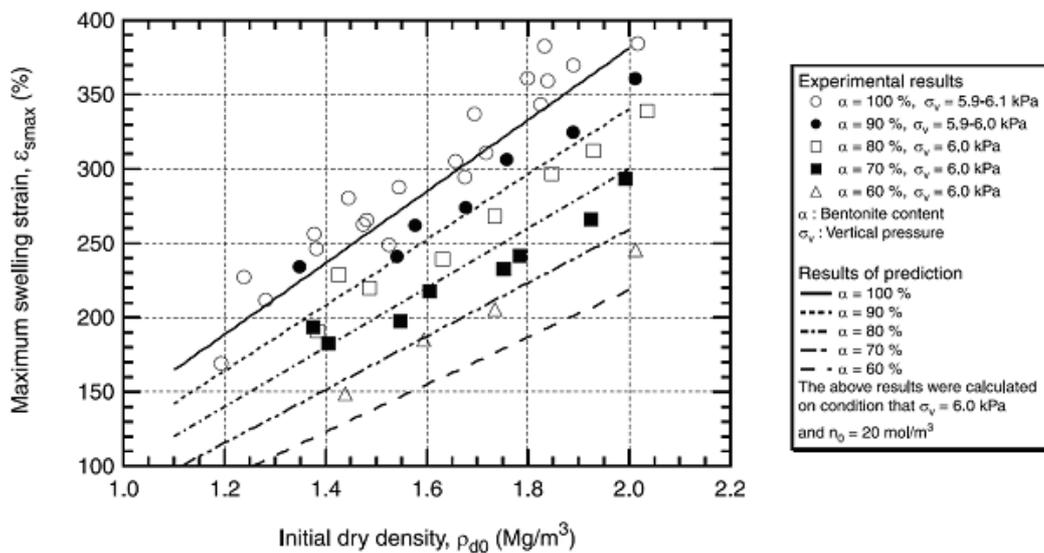


Figure 5.2.9 : Relation entre le gonflement maximal et la densité sèche initiale dans le cas $\sigma_v = 6 \text{ kPa}$. (Komine & Ogata 2003)

Kassif & Ben-Shalom (1971) ont aussi démontré le rôle de la succion sur le gonflement. Selon eux, coté humide de l'optimum Proctor, la pression de gonflement est comparable à la différence entre la succion initiale d'un échantillon soumis au gonflement libre et la succion finale de cet échantillon constamment mouillé, dans la même gamme de teneur en eau à volume constant. Par contre, du coté sec, la pression de gonflement n'est plus qu'une partie de la succion initiale. Dans le premier cas, le sol est quasi-saturé, et il y a équivalence entre la réduction de succion provoquée par le mouillage progressif du matériau et l'augmentation de

pression de gonflement. En effet, la pression de gonflement ne peut pas être supérieure à la succion dissipée (Brackley, 1983). Dans le deuxième cas, lorsque le sol sec est humidifié, l'eau va remplir, d'abord, les pores de petite taille, et ainsi provoquer une chute de succion considérable sans entraîner une déformation volumique ou une pression de gonflement significative (Kassif et Ben Shalom, 1971). Ainsi, la pression de gonflement P_s développée par un sol est fonction de la succion s du sol, selon la relation :

$$s = \alpha P_s \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \alpha > 1 \text{ pour un sol non saturé,} \\ \alpha < 1 \text{ pour un sol voisin de la saturation} \end{array}$$

Cela veut dire que la pression de gonflement d'un sol saturé ou voisin de la saturation est égale à sa succion (déchargement ou contrainte capillaire), par contre la pression de gonflement d'un sol non saturé est inférieure à sa succion.

La mesure du gonflement unidirectionnel d'échantillons de sol soumis à des paliers de succion décroissants montre que le taux de gonflement croît d'autant plus que la succion décroît, et que l'essentiel du gonflement se produit pour les petites valeurs de la succion (Figure 5.2.10).

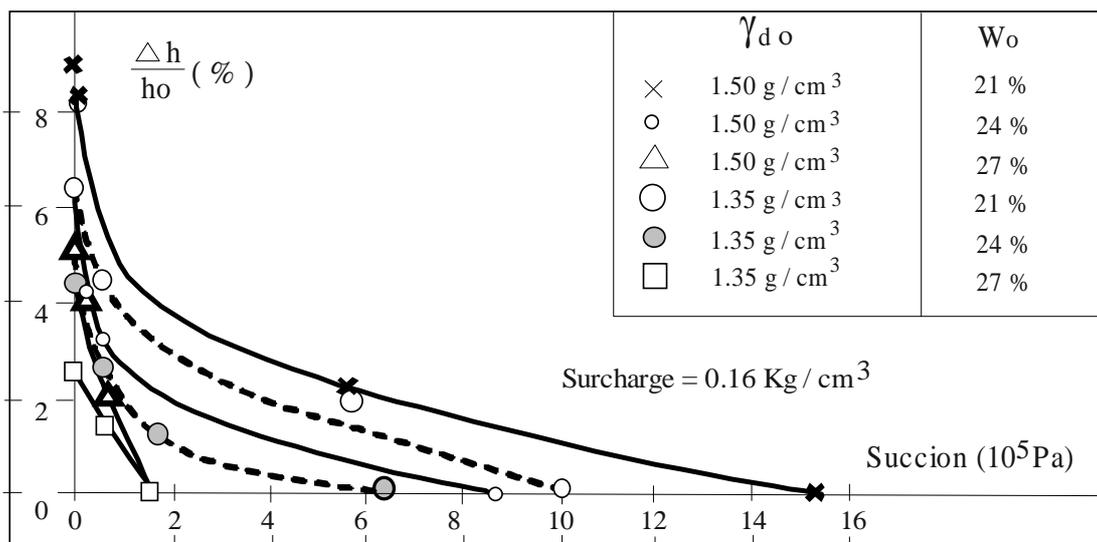


Figure 5.2.10 : Relation entre taux de gonflement et succion (d'après Kassif et Ben Shalom, 1971)

En conclusion, au vu des résultats présentés précédemment, il semble que le gonflement maximal augmente avec l'augmentation de la densité sèche et que le gonflement est réduit lorsque ce matériau est soumis à une contrainte externe. Par contre, le rôle de la teneur en eau sur le gonflement n'est encore pas totalement élucidé.

Un certain nombre d'autres paramètres influencent aussi le processus de retrait-gonflement tels que l'histoire des contraintes subies par le matériau (intensité, mode d'application des contraintes, etc.), la contrainte verticale appliquée (Alonso et al., 1987, 1993, 1999 ; Cui et al., 2002), la température (Robinet et al., 1996 ; Tessier et al., 1998 ; Sultan et al., 2002), les cycles de séchage et remouillage (Basma et al., 1996 ; Al-Homoud et al., 1995 ; Day, 1994,

1995 ; Dif & Bluemel, 1991), l'air occlus dans le sol (Ladd, 1960 ; Wilding et Tessier, 1988), la durée de l'essai et la taille de l'échantillon (Chen, 1988 ; Vayssade, 1978 ; Ladd, 1960).

In-situ, le phénomène de retrait-gonflement est influencé aussi par le climat, la topographie, la végétation, et les conditions hydrologiques du terrain (Wilding et Tessier, 1988).

Il est cependant nécessaire de souligner que les mesures faites au laboratoire sont parfois différentes des observations de terrain à cause de l'effet d'échelle (différence de taille entre échantillon et massif). Un échantillon ne représentera jamais l'ensemble des couches géologiques qui interviennent dans la réponse du massif.

6 Rôle du processus de retrait gonflement sur l'évolution texturale/structurale des sols

Comme il a été déjà souligné, les sols argileux sont organisés à différentes échelles et à chaque échelle d'observation correspond un état d'organisation spécifique. A chaque échelle correspond une texture du matériau à l'équilibre dans des conditions mécaniques et hydriques données ou appliquées (Tessier, 1984 ; Al-Mukhtar et al., 1996) et une variation de ces conditions peut provoquer la modification de cette texture.

Or, la texture joue un rôle important dans le comportement d'un sol. Ainsi, dans un sol partiellement saturé, elle contrôle le potentiel ou l'état de succion de l'eau : alors que la composition minéralogique du sol influence à priori la composante d'adsorption de succion matricielle, la morphologie du sol contrôle la composante capillaire (Alonso et al., 1987). Dans ce paragraphe seront abordés quelques résultats de la littérature montrant les modifications de la texture d'un sol, soumis à différentes sollicitations.

La dessiccation et l'humidification en général entraînent une réorganisation de la phase solide. Les résultats des travaux réalisés par différents chercheurs (Tessier, 1984 ; Ben Rhaïem et al., 1986 ; etc.) ont montré que l'évolution de la texture (taille des particules argileuses et porosité) d'un sol argileux lors de sollicitations hydriques dépend du type d'argile et des cations compensateurs, mais aussi de la succion appliquée. Cette évolution de la microstructure (feuillet, cristallites, quasi-cristaux, micro-agrégats,...) est caractérisée en particulier, par l'observation en microscopie électronique à balayage (MEB) et à transmission (MET) et par l'analyse de la diffraction des rayons X aux petits angles (DPAX).

6.1 Phase de dessiccation

Dans les smectites, en général, la dessiccation provoque un rapprochement des particules constitutives et ainsi une réduction de leur nombre, par suite du regroupement des particules les plus fines entraînant une augmentation du nombre moyen de feuillets par unité. Cependant, la réorganisation de la phase solide dépend fortement des niveaux de succion appliquée (Tessier, 1984 ; Ben Rhaïem et al., 1986, 1987 ; Wilding et Tessier, 1988). Dans le cas des smectites calciques par exemple, lorsque la succion appliquée est inférieure à 1 MPa, seule l'eau contenue à l'extérieur de l'espace interfoliaire est évacuée et la distance interfeuille (d) reste de 1.86 nm (\approx trois couches d'eau) (Tableau 6.1.1). Dans cette gamme de succion la structure interne des particules n'est donc pas modifiée sous l'effet de la pression et le nombre moyen de feuillets par particule reste de 55. Par contre, lorsque la succion augmente, l'eau dans l'espace interfoliaire tend à être éliminée, la distance interfoliaire passe à 1,56 nm (\approx deux couches d'eau) et le nombre de feuillets par particule augmente. A partir de 1 MPa le nombre de feuillets passe de 55 à 225 et lorsque la succion atteint 100 MPa le nombre moyen de feuillets par empilement élémentaire augmente jusqu'à 400 (Tableau 6.1.1). Par contre, dans les smectites sodiques, pour une solution diluée ($<10^{-3}$ M), ces mêmes auteurs ont remarqué que le départ d'eau interfoliaire, même à 100 MPa, n'entraîne qu'un accroissement très limité de la taille des particules (ou des quasi-cristaux). Le nombre moyen des feuillets par quasi-cristal n'augmente que de 8 à 20 lorsque la succion

augmente jusqu'à 100 MPa. Ceci démontre que le phénomène de retrait-gonflement est lié au changement de taille des particules responsable des variations de la porosité du sol.

Tableau 6.1.1 : Evolution du nombre de feuillets par particule lors de la dessiccation et de la réhumectation de smectite calcique de Wyoming (10^{-3}) (Ben Rahiem et al., 1987)

Potentiel matriciel (10^5 Pa) (bars)	N° de feuillets par particule	Espace interfoliaire (nm)
<i>première dessiccation</i>		
0,033	55	1.86
1	55	1.86
10	225	1.86
1000	400	1.56
<i>réhumectation</i>		
10 → 0,033	65	1.86
10 → 1	65	1.86
1000 → 0,033	90	1.86
1000 → 1	170	1.86

Par ailleurs, les observations au MEB faites par Tessier (1984) montrent que la première dessiccation favorise aussi une réorganisation de la microstructure, allant vers une orientation préférentielle des particules pour des faibles succions jusqu'à 0,1 MPa, suivie ensuite d'une désorganisation. Ainsi, avec une augmentation de la succion, l'orientation des particules d'abord très faible passe par un maximum et décroît ensuite.

Dans le cas des smectites, quel que soit la nature du cation échangeable et la concentration de la solution, on observe une réduction de la taille des pores et une diminution du nombre de pores. Pour les illites et les kaolinites, on observe une réorganisation des particules qui tendent à se disposer face à face. Lorsque la succion augmente, l'organisation des microdomaines et des cristallites isolés s'orientent fortement, les particules évoluent, au cours de la dessiccation, vers une organisation où elles sont toutes en contact.

Cette étude montre que la dessiccation change la configuration de la microstructure, l'orientation et la surface spécifique des particules. La taille des particules d'argile est donc une propriété temporelle qui dépend du changement de succion du sol (Wilding & Tessier, 1988). La réduction de la taille des pores et la diminution du nombre de pores, accompagnant la dessiccation, entraînent alors une diminution de volume ou une contraction macroscopique du sol, qui est le phénomène de retrait (Figure 6.1.1). Bien que ces observations soient faites essentiellement sur des argiles pures ou quasiment pures, des observations similaires sur des sols naturels ont été commentées par différents auteurs (Tessier, 1984 ; Wilding & Tessier, 1988, etc.). Audiguier (1979), Audiguier et Delage (1987), ont montré par analyse des spectres de porosité de formations argileuses naturelles, dont l'argile verte de Romainville et la marne blanche de Patin, que pour des matériaux à matrice argileuse soumis à des potentiels matriciels croissants, le séchage se fait avec rétraction entraînant une diminution de la

dimension des pores et une diminution de la porosité totale, contrairement aux matériaux à squelette granulaire où le séchage entraîne une augmentation de la dimension des pores et une diminution de la porosité totale.

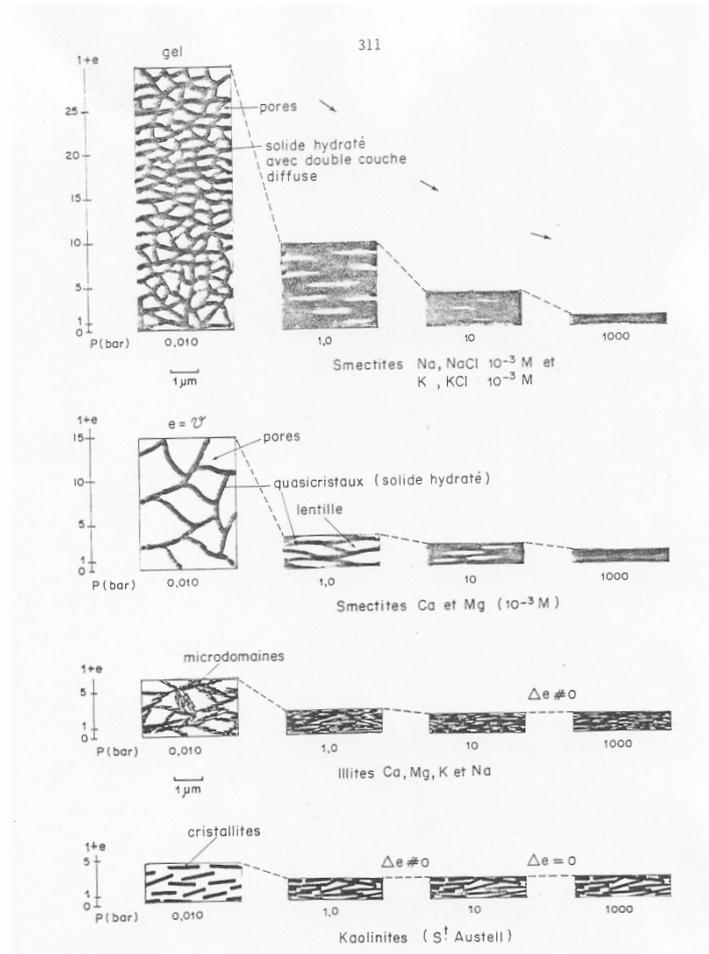


Figure 6.1.1 : Représentation schématique de l'évolution du volume apparent d'argiles au cours de la première dessiccation en fonction de la succion (depuis $s = 0.01$ bar jusqu'à 1000 bar), (d'après Tessier, 1984)

6.2 Phase d'humectation

Lors de l'humectation, l'absorption d'eau semble s'accompagner d'un écartement des particules constitutives de l'argile. Le nombre de feuillets par particule élémentaire (ou quasi-cristal) diminue (Tableau 6.1.1). Autrement dit, la réhumectation ou le processus de gonflement résulte d'un phénomène de décollement ou de « clivage » (Tessier, 1984) des quasi-cristaux à l'opposé de la dessiccation qui correspond à l'accolement des feuillets et ainsi à un accroissement des cristaux (Tessier, 1984 ; Ben Rhaïem, et al., 1987 ; Saiyouri et al., 1998 ; Van Damme, 2002). Cependant, le processus n'est généralement pas complètement réversible. Pour les smectites calciques, par exemple, bien que la distance interfoliaire, avant et après un cycle de dessiccation et réhumectation, reste identique (Tessier, 1984 ; Ben Rhaïem et al, 1986), les travaux de Tessier (1984), Ben Rhaïem, et al., (1987, d'après Wilding & Tessier, 1988) ont montré que les particules et les pores ne retrouvent pas leur taille initiale. Ainsi la réversibilité du système semble se limiter à l'espace interfoliaire et la taille des quasi-cristaux dépend du niveau de contrainte hydrique auquel le sol a été soumis.

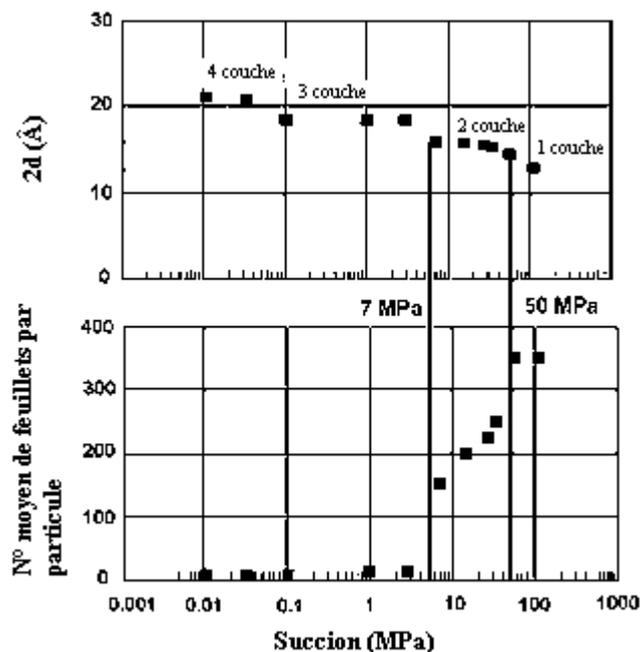


Figure 6.2.1 : Influence de la succion sur la distance interfoliaire et sur la structure d'une smectite MX80 (d'après Saiyouri et al., 1998)

Les travaux de Saiyouri et al (1998), concernant l'étude de la diffraction RX aux petits angles de l'hydratation d'une smectite MX80 compactée, montrent qu'au cours de l'hydratation (et de la diminution de la succion à laquelle est soumise l'échantillon), la distance entre les feuillets élémentaires augmente par adsorption progressive de couches d'eau. Ainsi pour une succion inférieure à 50 MPa l'hydratation intraparticulaire passe de une à deux couches d'eau, à partir de 7 MPa elle est de 3 couches pour atteindre 4 couches dans le cas d'une succion quasi nulle. Dans le même temps les particules d'argile composées initialement de 350 feuillets se divisent et leur épaisseur passe à une dizaine de feuillets, augmentant ainsi de façon considérable l'espace interparticulaire accessible à l'eau (Figure 6.2.1).

Par ailleurs, Vayssade (1978) et Parcevaux (1980), travaillant sur des sols argileux naturels (gonflants et non gonflants) du bassin de Paris, ont noté que lors de l'humectation sous faible contrainte verticale ($0,5 \cdot 10^5$ Pa), qui s'exprime par un gonflement macroscopique, les agrégats s'écartent les uns des autres et, de ce fait, ouvrent les seuils de la macroporosité. Selon Vayssade (1978), le gonflement s'exprime aussi par une diminution de la porosité intra-agrégats (rayon de seuil $< 0,15 \mu\text{m}$). A l'opposé, Parcevaux (1980) a noté que la porosité intra-agrégats n'est pas ou quasiment pas affectée au cours de gonflement mais qu'un processus de division des agrégats peut se produire lors de l'humectation (Figure 6.2.2).

De même, Katti & Shanmugasundaram (2001), à partir d'observation au MEB et d'analyses d'image faites après saturation d'une bentonite sodique compactée et humidifiée jusqu'à obtenir un gonflement de 50 et 75 % de son volume initial, ont constaté que le gonflement produit une division des agrégats argileux en particules plus petites (Figure 6.2.3). Mais selon Tessier (1984) et Popescu (1980), la division des agrégats ne se produit que lorsque le

gradient de succion de l'eau auquel le sol est soumis est élevé, autrement dit, lorsque la réhumectation est faite brutalement.

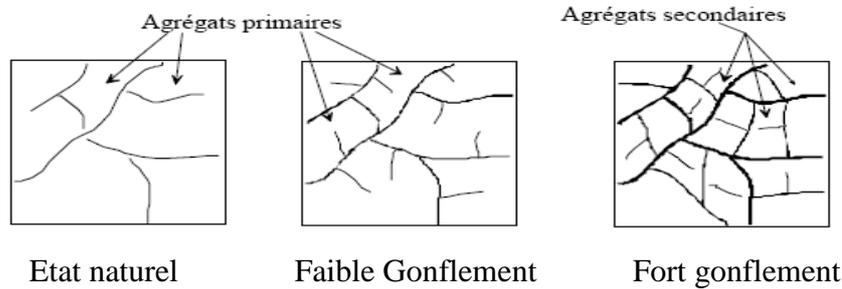


Figure 6.2.2 : Evolution de la texture du sol au cours du gonflement (d'après Parcevaux, 1980)

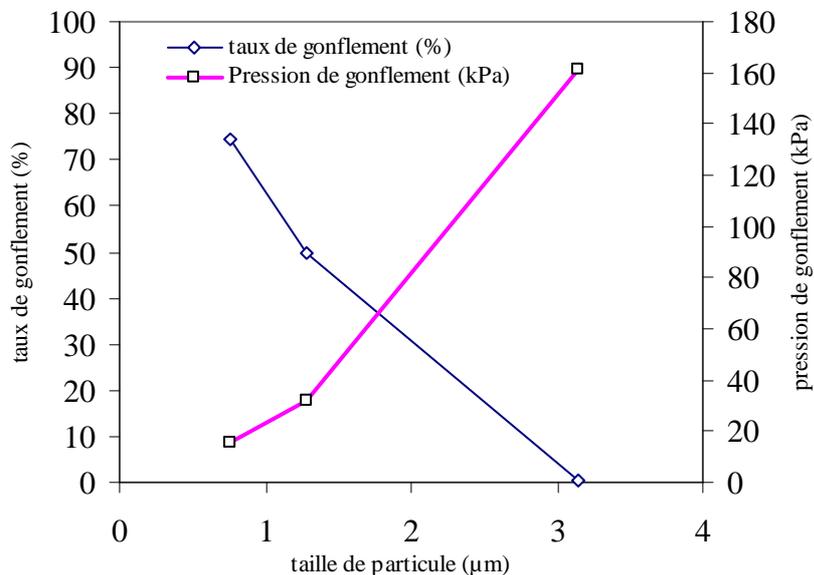


Figure 6.2.3 : Relation entre taille moyenne des particules et pression ou taux de gonflement (d'après Katti & Shanmugasundaram, 2001)

Cui et al (2002) ont montré, à partir d'un mélange de sable et de bentonite (48 % bentonite) compacté, que lorsque l'humectation se fait sous confinement ou volume constant, le gonflement se traduit par une réduction de la macroporosité. Au cours de l'expérience, la succion exercée sur les éprouvettes a été réduite par paliers successifs et à chaque palier, la courbe porosimétrique du matériau a été réalisée. L'humectation provoque la fragmentation et la déformation des agrégats entraînant un comblement de la macroporosité qui se ferme progressivement jusqu'à l'obtention d'une structure du sol isotrope à succion nulle. Cuisinier (2002) ont obtenu des résultats semblables pour un mélange à 40 % de limon et 60 % de bentonite, compacté et humidifié sans confinement.

Des observations similaires ont été notées par Tovey et al. (1973, d'après Delage et Graham, 1995) sur des argiles naturelles d'Israël moyennement gonflantes. Ils ont noté que lors d'une hydratation sans confinement, le gonflement du sol se produit entre domaines. Par contre,

lorsque l'hydratation du sol se fait sous confinement, une réorganisation interne des particules se produit, due au gonflement intra-domaines lui-même responsable de la compression des pores inter-domaines.

Par ailleurs, Camara (1982), Tessier (1984), Wilding & Tessier (1988) et Saiyouri et al. (1998), ont remarqué que suite à l'humectation, le gonflement peut provoquer un microcisaillement responsable d'une réorientation des particules argileuses.

6.3 Rôle des aspects cycliques des sollicitations hydriques

Dans la nature, les matériaux argileux sont soumis à des cycles répétés d'humectation et de dessiccation pour lesquels l'état initial et l'état final changent d'un cycle à l'autre. De nombreux travaux ont été menés pour simuler des déformations engendrées par des variations saisonnières de teneur en eau ou l'effet de sollicitations hydriques cycliques. Ainsi de nombreux auteurs (Popesco, 1980 ; Chen et Ma, 1987 ; Subba Rao & Satyadas, 1987 ; Day, 1994, 1995 ; Al Homoud et al., 1995 ; Basma et al., 1996 ; Tripathy et al., 2002) ont étudiés des matériaux remaniés et compactés en soumettant les éprouvettes alternativement à des phases d'imbibition et des phases de séchage (par injection d'air dans les plaques poreuses par exemple, ou par évaporation naturelle).

Les résultats obtenus par Chen et Ma (1987), Subba Rao & Satyadas (1987), Al Homoud et al. (1995), Basma et al. (1996), Tripathy et al. (2002), sur des éprouvettes soumises alternativement à des phases d'imbibition totale et des phases de séchage ou retrait partiel montrent que sous l'effet répété de cycles, les sols présentent des signes de fatigue après chaque cycle, se traduisant par une variation du potentiel de gonflement (Figure 6.3.1a, Figure 6.3.2a et Figure 6.3.3a), une diminution de la pression de gonflement (Figure 6.3.2b) et donc de l'aptitude à absorber de l'eau. A l'inverse, l'évolution du potentiel de retrait n'est pas significative.

Al Homoud et al. (1995) et Basma et al. (1996) ont entrepris des études systématiques du gonflement, respectivement de six et de quatre argiles différentes. Elles montrent que sous l'effet répété de cycles de séchage partiel et d'imbibition totale, les sols présentent des signes de fatigue. A titre d'exemple, les résultats obtenu par Basma et al. (1996) sur un sol remanié et compacté ($\epsilon = 51\%$; $I_p = 29\%$, $W_L = 62\%$, $\gamma_d = 16,8 \text{ kN.m}^{-3}$, 30 % montmorillonite, 13 % illite et 51 % kaolinite), sont présentés sur la Figure 6.3.1a et sur la Figure 6.3.2a. Le premier cycle provoque la plus grande réduction du potentiel de gonflement, qui diminue encore pendant les cycles suivants pour se stabiliser au bout de quatre ou cinq cycles. Ce phénomène conduit à l'agrégation des particules qui entraîne une disposition, de ces dernières, plus stable vis-à-vis de l'absorption d'eau.

Les résultats de Popescu (1980), Osipov et Rumjantseva (1987), Day (1994), Day (1995), Basma et al. (1996), Tripathy et al. (2002) montrent l'effet contraire. Lorsque l'argile est à une teneur en eau inférieure à celle de sa limite de retrait, le potentiel du gonflement (Figure 6.3.1b, Figure 6.3.2a et Figure 6.3.3b) ainsi que la pression de gonflement (Figure 6.3.2b) augmentent avec le nombre de cycles d'imbibition et de dessiccation. Par ailleurs, le potentiel de retrait diminue progressivement avec le nombre de cycles d'imbibition et de dessiccation (Figure 6.3.1b).

Par contre les résultats de Dif et Bluemel (1991) qui sont obtenues après des cycles d'imbibition-drainage complet-imbibition (Figure 6.3.3b), montrent des résultats différents qui semblent être liés au mode d'essai où les sollicitations hydriques cycliques sont faites sous une pression verticale plus grande (100 kPa) que pour les autres essais (~6.9 kPa). Toutefois, dans tous les cas, le potentiel de gonflement se stabilise au bout de quatre ou cinq cycles (Figure 6.3.1, Figure 6.3.2 et Figure 6.3.3).

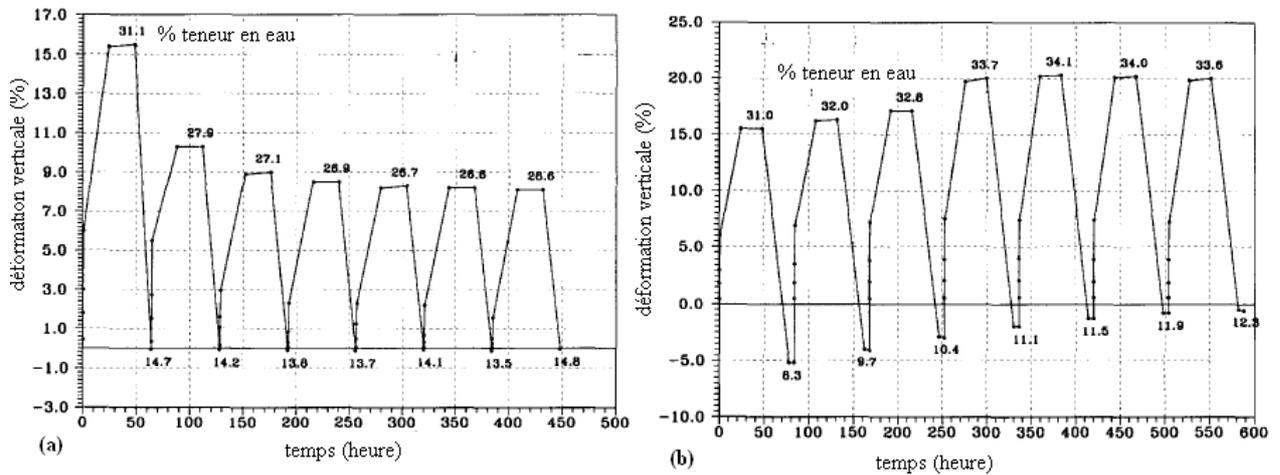


Figure 6.3.1 : Résultats des essais cycliques séchage-humidification sur un sol remanié et compacté ($< 2\mu\text{m} = 51\%$, $I_p = 29\%$, $W_L = 62\%$, $\gamma_d = 16,8 \text{ kN.m}^{-3}$, 30 % montmorillonite, 13 % illite et 51 % kaolinite ; a) séchage partiel, b) séchage complet, d'après Basma et al., 1996)

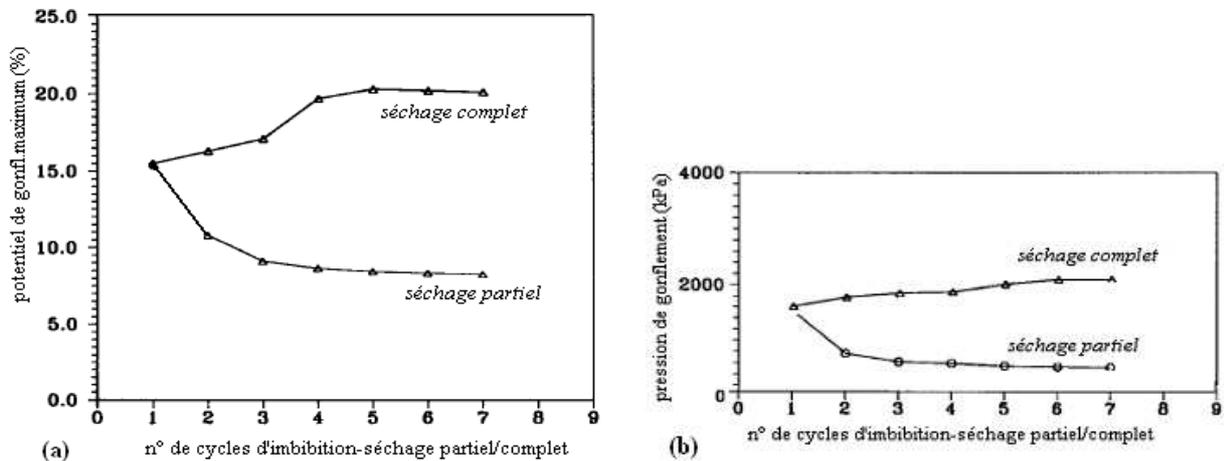
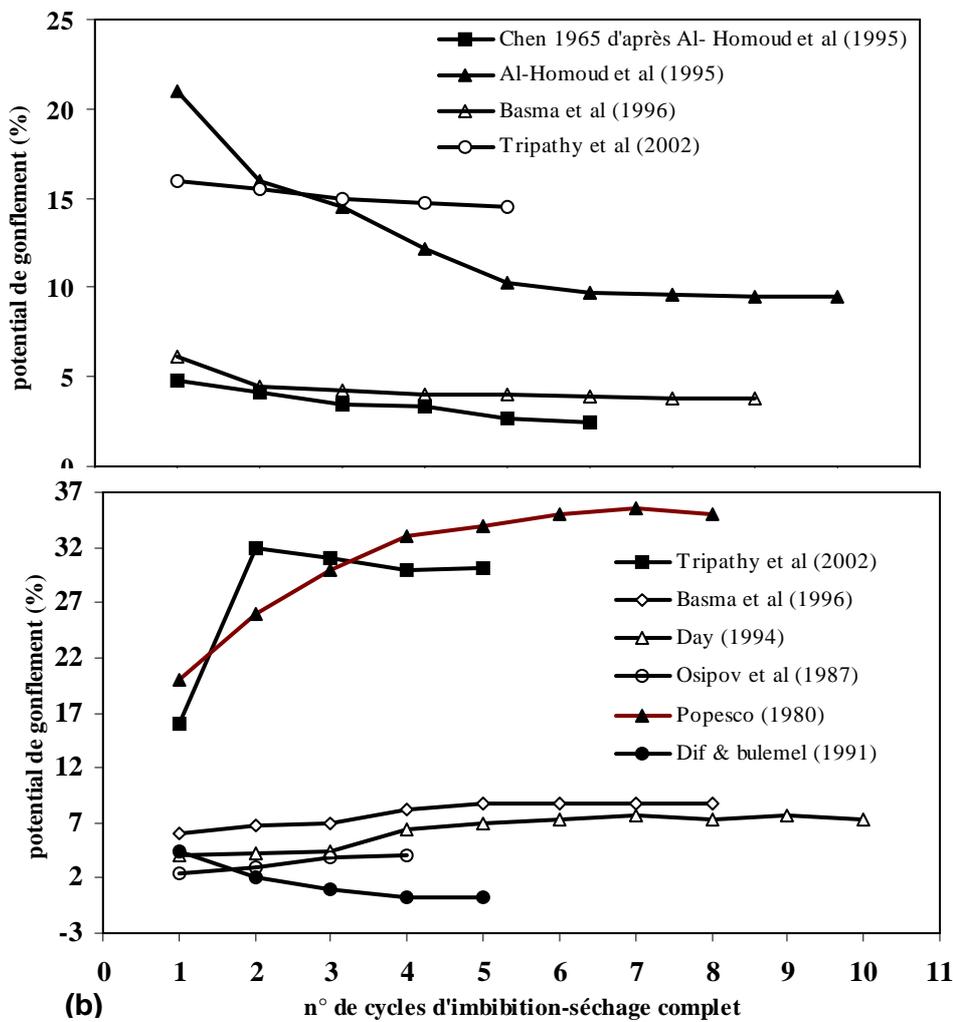


Figure 6.3.2 : Evolution du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement lors des cycles cycliques d'imbibition-séchage sur un sol remanié et compacté ($< 2\mu\text{m} = 51\%$, $I_p = 29\%$, $W_L = 62\%$, $\gamma_d = 16,8 \text{ kN.m}^{-3}$, 30 % montmorillonite, 13 % illite et 51 % kaolinite; (d'après Basma et al., 1996)

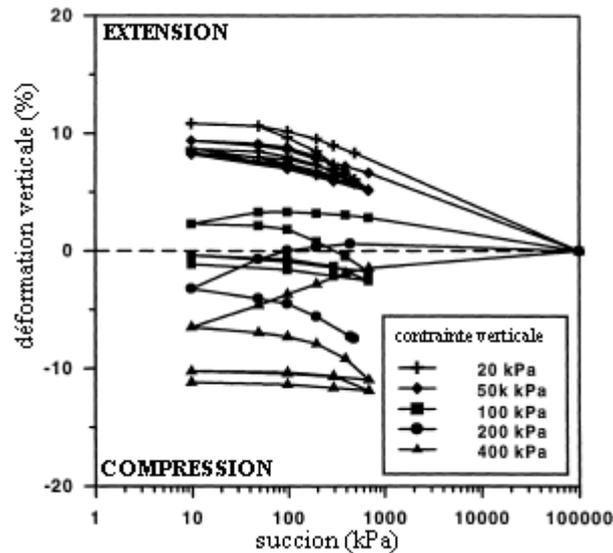
Bien que ces différents essais ne soient pas faits dans les mêmes conditions, dans la majorité des ces travaux, le premier cycle provoque la plus grande réduction/augmentation du potentiel de gonflement/retrait, qui diminue/augmente pendant les cycles suivants pour se stabiliser après quatre ou cinq cycles. Les résultats de Tripathy et al (2002) montrent en particulier que l'effet des conditions initiales (densité et teneur en eau) est quasiment nul après quatre ou cinq

cycles d'imbibition et de dessiccation, ce qui est en accord avec les observations faites par Yong et Warkentin (1975) et Day (1995). Ces derniers ont noté que sous l'effet répété de cycles d'humectation et de dessiccation les caractéristiques héritées des conditions de dépôts disparaissent et le retrait dépend essentiellement du type d'argile.

Figure 6.3.3 : Evolution du potentiel de gonflement lors de sollicitations hydriques cycliques selon différents auteurs (un cycle = imbibition/séchage partiel (a), séchage complet (b))



Comme on l'a souligné précédemment la pression verticale appliquée au sol au cours des essais de sollicitations hydriques cycliques joue un rôle important sur son comportement. Les résultats des sollicitations hydriques cycliques réalisées par Alonso et al (1995) et par Cuisinier (2002) sur des sols gonflants compactés montrent qu'il est possible d'obtenir à partir du même état initial, au cours des cycles, soit une accumulation des phénomènes de compression successifs soit au contraire une augmentation des phénomènes d'extension en fonction de la contrainte verticale appliquée (inférieure ou supérieure à la valeur de



compactage). Ainsi la Figure 6.3.4 représente les résultats d'essais réalisés sur des pastilles d'argile de Boom compactée, soumises à des sollicitations hydriques cycliques sous différentes charges verticales constantes. Les pastilles d'argile (2mm) schématisent le modèle d'arrangement des particules dans les sols argileux en « double-structure », choisi par Gens et Alonso (1992) dans leurs simulations du comportement de sol gonflant.

Figure 6.3.4 : déformation verticale d'une argile gonflante compactée (argile de Boom), lors de cycles d'humidification/dessiccation réalisés sous différentes charges verticales constantes (d'après Alonso et al, 1999)

Les résultats de Villar (1999) et de Cuisinier (2002) complètent les précédents en montrant l'importance du début du chemin hydrique (drainage-imbibition ou imbibition-drainage) sur les phénomènes d'extension ou de compression. Suivant le chemin hydrique de départ, l'un ou l'autre de deux phénomènes sera prépondérant et l'amplitude de la déformation axiale totale sera différente (Dif et Bluemel, 1991).

Le même type d'essai réalisé par Cui et al. (2002) sur une argile gonflante très fortement compactée (densité sèche initiale de $18,5 \text{ kN.m}^{-3}$ obtenue par un compactage isotrope à 60 MPa) (Figure 6.3.5) ne montre, pas au cours des cycles, les phénomènes d'hystérésis observés par Alonso et al (1999) sur les sols moins denses dans lesquels l'effet physico-chimique pourrait être moins important. Les cycles de succion entre 0,35 MPa et 38 MPa n'engendrent pas de déformations irréversibles même sous de fortes pressions verticales (10 MPa et 20 MPa). En effet, dans ces échantillons fortement compactés, les macro-pores ont presque disparu, l'hydratation entraîne donc seulement le gonflement des agrégats qui engendre l'augmentation du volume total.

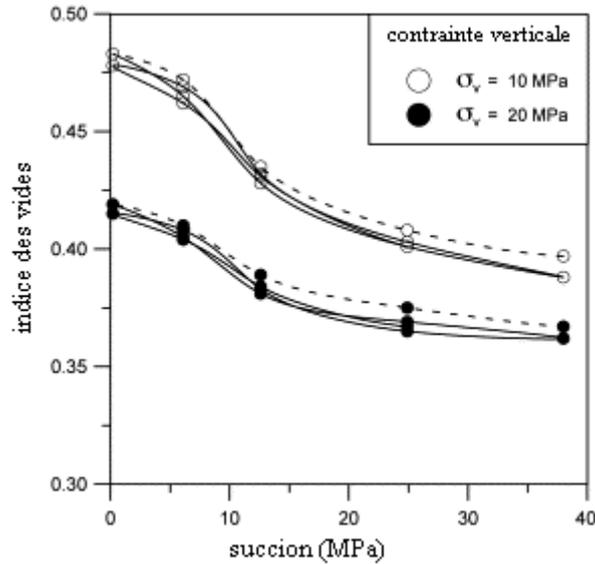


Figure 6.3.5 : Changement de l'indice des vides pendant les cycles séchage - humidification des échantillons fortement compactés. (Cui et al. 2002)

Des changements microstructuraux sont notés par Al-Homoud et al. (1995) et par Basma et al. (1996) au cours des cycles. Ils ont remarqué à partir des observations au MEB faites avant et après les cycles d'imbibition et de dessiccation un réarrangement progressif des particules argileuses pendant les cycles, qui par agrégation, conduit à une structure plus stable vis-à-vis de l'imbibition. Selon leurs interprétations, l'échantillon initial constitué de microagrégats faiblement orientés soumis à des cycles d'humectation et de dessiccation complet ou partiel présente, après 5 cycles hydriques, une texture différente. Dans le cas d'un séchage complet, une texture avec une orientation préférentielle horizontale des particules d'argiles et avec une forte capacité d'absorption d'eau est observée. Par contre, dans le cas d'un séchage partiel, la texture est réorganisée en texture fluidale « turbulente » et floculée avec des contacts bord face qui résultent d'une plus faible absorption d'eau. Ces interprétations sont partagées par Day (1994).

Par ailleurs, Al-Homoud et al. (1995) et Day (1994) ont noté que la perméabilité du sol augmente en fonction du nombre de cycles humectation-dessiccation, cette augmentation est due à l'agrégation des particules argileuses. Allam et Sridharan (1981) ont constaté que des liaisons entre agrégats sont générées au cours des cycles imbibition-drainage entraînant leur meilleure stabilité dans l'eau.

De plus, Basma et al (1996) ont remarqué, à partir de mesures de la vitesse du son, une augmentation de l'indice des vides dans le cas de dessiccation complète, et une diminution dans le cas de dessiccation partielle (Figure 6.3.6). Selon eux, dans le cas de retrait partiel, l'air est piégé dans les pores et une pression négative se développe qui entraîne la diminution des vides. Par contre, dans le cas de retrait complet l'évaporation rapide d'eau libre se fait en écartant les particules et ainsi augmente les vides apparents

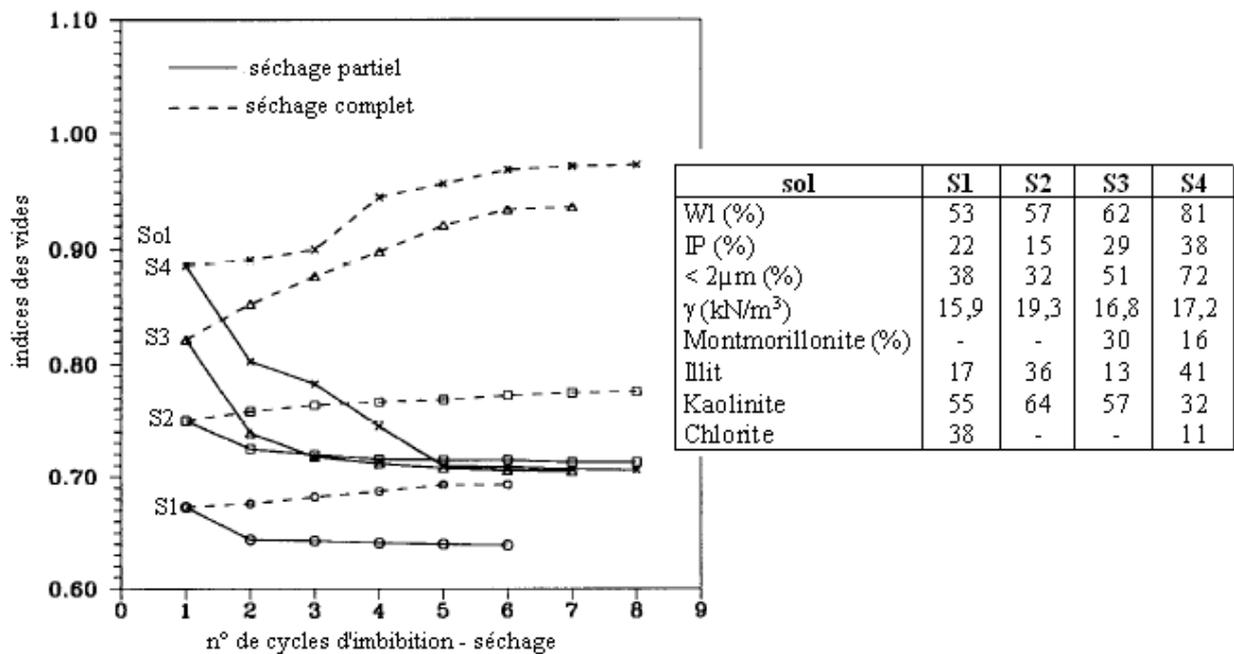


Figure 6.3.6 : Evolution de l'indice des vides lors des cycles d'imbibition - séchage (d'après Basma et al, 1996)

6.4 Fissuration

Sous des climats tempérés, les sols argileux sont souvent quasi saturés, et leur potentiel de gonflement est alors limité. Cependant, lors de périodes de sécheresse prolongée, la dessiccation provoque une réorganisation des constituants de ces sols ; il en résulte un retrait, se manifestant par une modification de la porosité du sol et notamment par l'apparition de fissures. Un nouvel apport d'eau, au sol sec, peut induire aussi un autre type de fissuration (Fang et al., 1983, 1994 ; Blight 1997).

Les fissures ainsi créées peuvent altérer les caractéristiques géotechniques du sol. Les fissures forment des chemins favorisant l'écoulement préférentiel de l'eau au travers du sol. Albrecht & Benson (2001) ont montré que la conductivité hydraulique augmente de $1 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ pour le sol intact humide à $1 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ pour le sol fissuré. De plus, la présence de fissures augmente la compressibilité du sol (Yesiller et al., 2000) et diminue le temps de consolidation (Morris et al., 1992). A l'échelle du massif, la présence de fissures diminue généralement la stabilité des pentes (Baker, 1981) et la portance de fondations (Silvestri et al. 1992).

6.4.1 Mécanismes en cause

La fissuration du sol est un phénomène observé fréquemment sur les sols naturels et sur les ouvrages en remblai. Elle est due au déséquilibre de l'énergie interne, au sein du sol, causé, par une distribution variable de l'humidité, de la température, ou de l'énergie de compaction (Fang 1994). Ces fissures peuvent apparaître dans les plans de faiblesse préexistants, à l'intérieur des agrégats du sol.

Les fissures observées à la surface d'un sol, ayant subi des cycles de dessiccation et d'humidification, sont dues en général, aux effets cumulés du retrait et du gonflement (Blight, 1997). Les sols qui s'assèchent diminuent de volume, et des fissures apparaissent en raison de la contrainte interne. Les fissures de retrait se créent si le retrait est empêché et/ou si une contrainte de tension, dépassant la résistance à la traction du sol, se développe au sein du sol (Konard & Ayad, 1997). La structure interne du sol (réseau rigide formé par des grains), la texture du sol (présence des grains grossier) et la présence de gradient d'humidité peuvent s'opposer à la diminution de volume du sol lors de séchage et ainsi favoriser la création de fissures (Towner 1988, Hueckel, 1992). Sur le terrain, le retrait du sol près de la surface peut être retenu par la sous-couche (le substrat) qui est moins sec (Konard & Ayad, 1997). De plus, in-situ, le sol est en situation de retrait restreint car une déformation latéral nulle est maintenue jusqu'à l'apparition de fissures à la surface.

Avec la perte d'eau, due essentiellement à l'évapotranspiration, la succion dans le sol augmente, engendrant une diminution de la contrainte horizontale σ_h . Quand σ_h devient nulle, le sol se fissure. La fissuration commence par la surface car, d'une part, la valeur de σ_h y est plus faible et, d'autre part, la succion y est plus importante (Blight, 1997). La concentration des contraintes en bout de fissure induit la propagation de ces fissures en profondeur, contrôlée par les champs de contrainte et les propriétés intrinsèques du sol (Konard & Ayad, 1997).

Si aucun autre phénomène n'intervient, l'humidification suivante a pour conséquence la fermeture des fissures. Mais, dans la plupart des cas, avant la réhumidification, les fissures sont comblées par des poussières transportées par le vent. Ainsi, lors de l'humidification, le gonflement du sol est partiellement ou totalement empêché, engendrant une pression de gonflement parallèle à la surface. Quand cette pression de gonflement dépasse la résistance au cisaillement du sol, on observe une fissuration qui peut-être attribuée au gonflement (Blight, 1997).

Hallaire (1984, 1988) a étudié la fissuration d'un sol argileux (Les Vignères), in situ et au laboratoire. Les résultats mettent en évidence deux phases de fissuration de ce sol au cours du retrait. La première phase accroît l'épaisseur des fissures dont le maillage semble déterminé dès la saturation, il en résulte alors un réseau dense de fissures fines. La seconde phase referme une partie de ces fissures fines et continue d'accroître l'épaisseur des fissures résiduelles, il en résulte alors un réseau plus lâche de fissures larges (Figure 6.4.1).

Cependant, des observations de fissuration in situ effectuées par Konrad et Ayad (1997) sur une argile intacte (argile de Saint-Alban, Québec) ne montrent pas une fermeture nette des fissures primaires (Figure 6.4.2).

Konrad et Ayad (1997) ont entrepris une étude systématique de la formation de fissures de retrait dans l'argile marine sensible, intacte et oxydée, de Saint-Alban à trois niveaux d'excavation et exposée à une évaporation continue durant 35 jours. Selon eux, la dessiccation de l'argile intacte de Saint-Alban, dans des conditions de retrait empêché, à une vitesse d'évaporation moyenne de $0,018 \text{ cm.h}^{-1}$ et une teneur en eau initiale de 103 %, a produit des fissures primaires après 17 heures avec un espacement moyen de 20 à 24 cm. Après environ 70 heures d'évaporation, des fissures secondaires, à l'intérieur de chaque polygone primaire sont apparues. Des fissures sub-horizontales, à une profondeur de 6 à 8 cm ont aussi été créées par suite de déformations dues au retrait différentiel des polygones de sol.

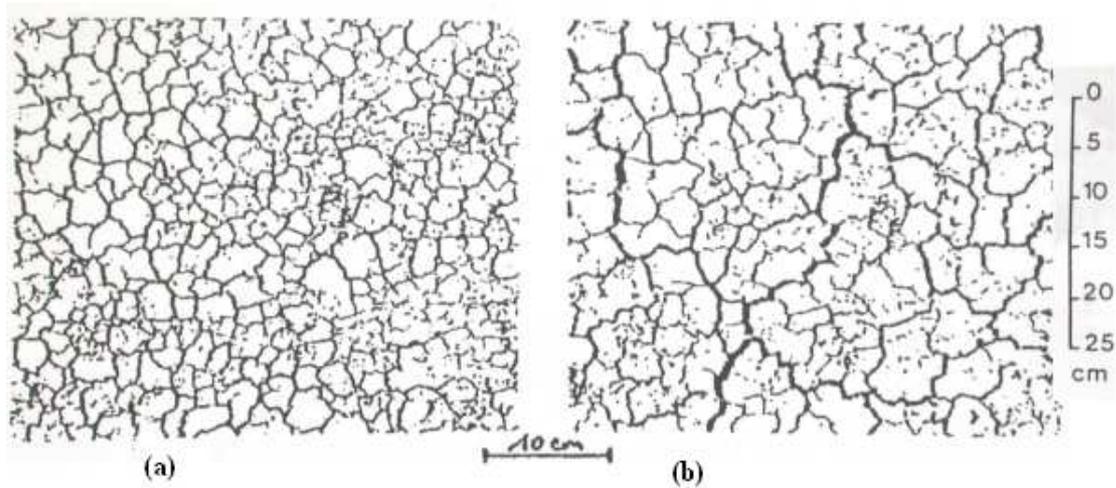


Figure 6.4.1 : Evolution d'un réseau de fissures entre le début (a) et la fin (b) du dessèchement (Hallaire, 1988)

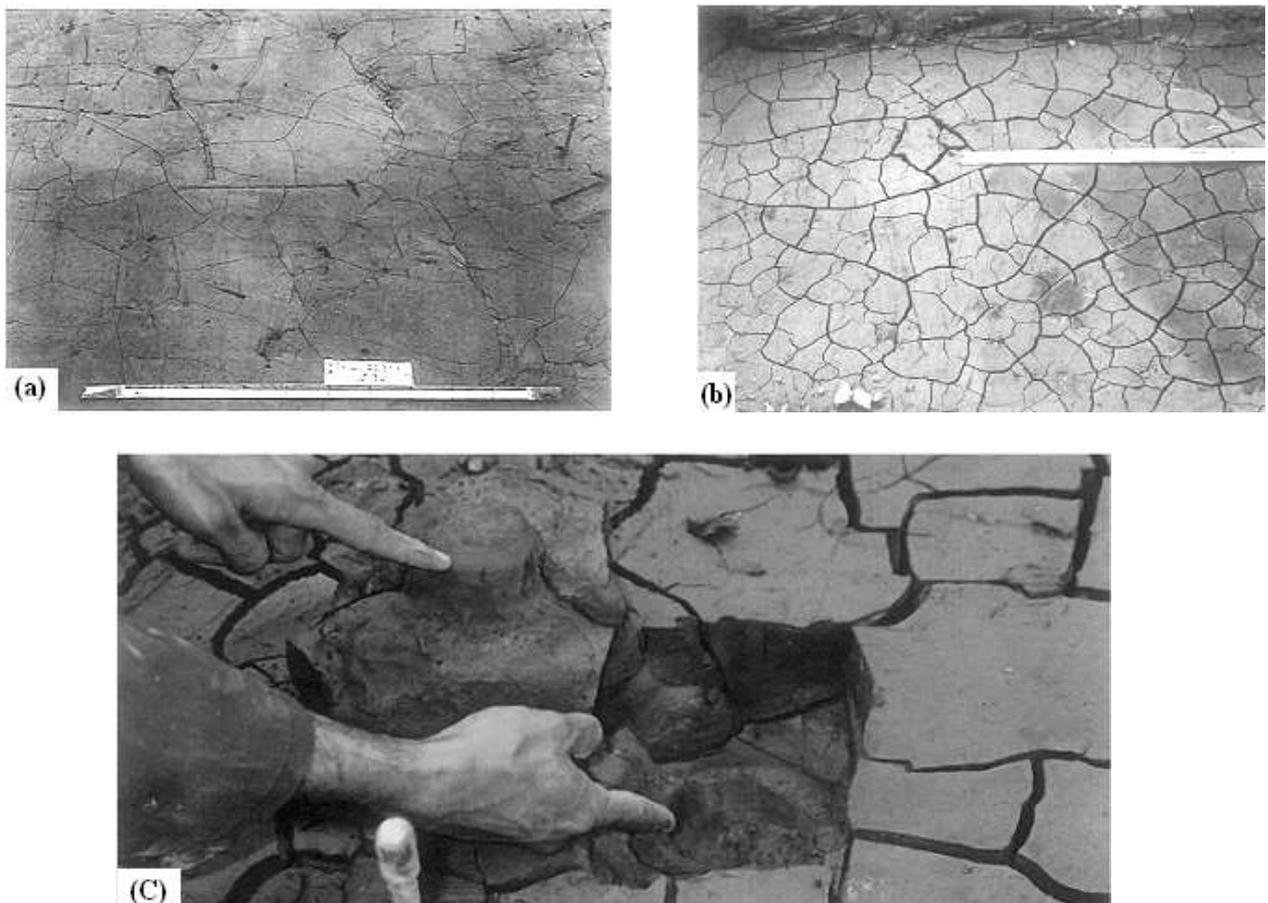


Figure 6.4.2 : Fissuration lors de la dessiccation de l'Argile intacte de Saint-Alban ; a) après 23 h de dessiccation, b) après 182 h de dessiccation, c) formation de protubérances sous les polygones après 2 h de dessiccation (d'après Konrad et Ayad, 1997)

Une évaporation additionnelle, sous le plan de cisaillement sub-horizontale, a entraîné la formation d'un nouvel ensemble de fissures verticales après environ 150 heures d'évaporation. Le changement de volume, induit par le retrait associé à ces différents ensembles de fissures, a produit des polygones présentant des protubérances dans leur partie inférieure. Ceci indique que la profondeur de la propagation des fissures, sous le plan de cisaillement horizontal, était d'environ 3 à 4 cm.

Ils ont également observé que dans l'argile oxydée à une teneur en eau initiale d'environ 50 %, des fissures sont apparues, après 17 à 20 heures d'évaporation, mais avec un espacement moyen de 10 à 12 cm. Selon eux, les espacements entre les fissures primaires sont reliés au type de sol. Ils n'ont observé aucune fissure dans le sol pulvérulent de surface.

La Figure 6.4.3 schématise les différents mécanismes intervenant dans le développement de la fissuration, lors de la dessiccation de cette argile intacte.

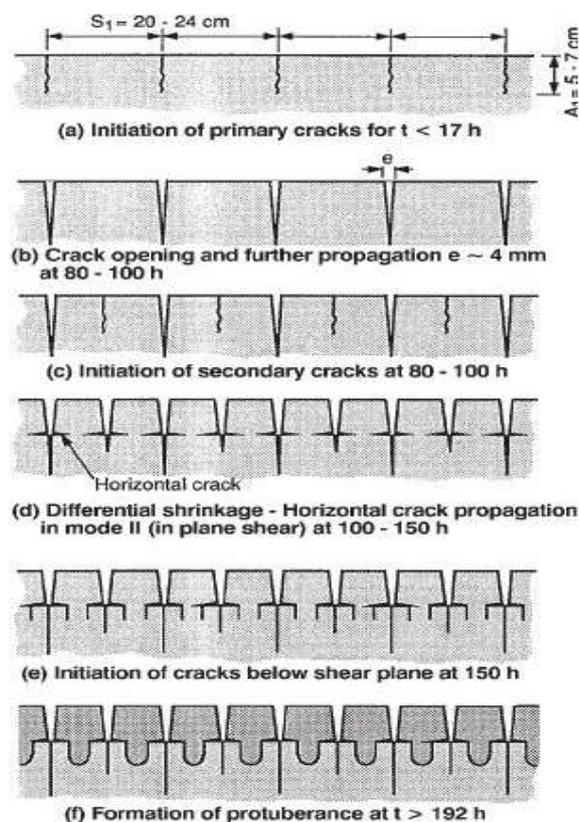


Figure 6.4.3 : Mécanisme intervenant lors de dessiccation de Argile de Saint-Alban (Konrad et Ayad, 1997).

Première phase : Initiation et formation des fissures primaires allant jusqu'à une profondeur de 5 cm suite à la première dessiccation en condition de retrait restreint (Figure 6.4.3a). Puis, augmentation de la largeur des fissures et de la contrainte de tension dans chaque polygone due aux déformations volumiques accompagnant le changement d'humidité, et propagation des fissures en profondeur (Figure 6.4.3b). Seconde phase : Initiation et formation des fissures secondaires à l'intérieur de chaque polygone primaire lorsque la contrainte de tension dépasse la résistance à la traction du sol sur la surface. Troisième phase : Propagation de fissures secondaires jusqu'à une profondeur contrôlée par les propriétés intrinsèques du sol (Figure 6.4.3c). Quatrième phase : Initiation et formation de fissures sub-horizontales à une profondeurs de 6 à 8 cm à l'intérieur des fissures existantes dues aux déformations horizontales induites par le retrait différentiel des polygones de sol (Figure 6.4.3d). Cinquième phase : Formation de fissures verticales dans le sol sous le plan de cisaillement sub-

horizontal (Figure 6.4.3e). Sixième phase : Formation de protubérances sous les polygones, produits par les changements de volume accompagnant la dessiccation (Figure 6.4.3f).

Des études menées sur des sols remaniés pâteux (préparés à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité puis déshydratés) ont montré que le développement et la géométrie des fissures dépendent de nombreux paramètres dont, la composition minéralogique, la teneur en argile, la teneur en eau de départ (Dyer et Coulson, 2003), le taux de séchage (température et humidité relative, Lecocq et Vandewalle, 2002 ; Tang et al, 2008) la mise en place (ou la nature de substrat) et l'échelle (épaisseur et diamètre) de l'échantillon (Colina, 1992 ; Dyer et Coulson, 2003 ; Péron et Laloui, 2005).

Les résultats de Dyer et Coulson (2003) montrent qu'une teneur en eau de départ et un indice de plasticité élevés favorisent la fissuration. Lecocq et Vandewalle (2002) et Tang et al. (2008) ont montré que le relâchement des contraintes, au cours du séchage rapide, favorise l'initiation de fissure au dépend du retrait. Leurs résultats montrent que le sol se fissure dans le domaine saturé au-dessus de la limite de retrait et selon Tang et al (2008), la teneur en eau à laquelle le sol commence de se fissurer augmente avec la température de séchage.

Les travaux de Colina (1992) et Dyer et Coulson (2003) ont montré que les dimensions (diamètre et épaisseur) des échantillons ont une influence considérable sur l'initiation et la géométrie des fissures. Les résultats des travaux de Colina (1992) montrent un réseau de fissuration très espacé dans les éprouvettes les plus épaisses et plus dense dans les éprouvettes les plus minces. Ce même auteur postule qu'il existe un rapport d'échelle minimum (diamètre sur épaisseur) au-dessous duquel le sol ne se fissure pas. Péron et Laloui (2005), ont observé une fissuration du sol seulement sur l'éprouvettes mise en place sur un support rugueux générant une résistance au cisaillement.

Tous ces résultats montrent que la fissuration du sol lors du dessèchement est complexe et que le mécanisme de fissuration n'est pas totalement élucidé.

7 Caractérisations directes et indirectes de l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement

La quantification du phénomène de retrait-gonflement par des paramètres macroscopiques est essentielle pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil.

Ce chapitre synthétise des données de la littérature concernant la caractérisation du retrait-gonflement.

Deux approches de la caractérisation du gonflement sont réalisées ; soit par des méthodes indirectes basées sur les paramètres géotechniques qui permettent d'identifier les sols sensibles à ce phénomène, soit par des méthodes directes s'appuyant sur des essais hydriques et mécaniques qui caractérisent plus précisément le comportement gonflant d'un sol.

7.1 Paramètres du gonflement

La complexité des phénomènes physico-chimiques et la diversité des processus, à différentes échelles, à l'origine du retrait-gonflement des sols argileux expliquent les difficultés de caractérisation.

Les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les sols sensibles au retrait-gonflement ne sont pas les mêmes selon que l'objectif choisi est d'empêcher le phénomène, ou de s'assurer qu'il se produira de façon progressive ou périodique, ou de construire l'ouvrage après achèvement du processus.

Dans la pratique trois paramètres mécaniques sont adoptés pour caractériser les propriétés des sols gonflants : la pression de gonflement, le gonflement libre et le potentiel de gonflement (Serratrice et Soyez, 1996). Cependant, bien que très largement utilisés, ces paramètres ne sont pas des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant. Ils dépendent de l'état initial du matériau et des conditions dans lesquelles se déroule le gonflement. Ainsi certains auteurs (Sridharan et al., 1986 ; Alonso et al., 1987 ; Habib et Karube, 1993) ont remarqué que la pression de gonflement dépend du chemin de contraintes.

Serratrice et Soyez (1996) ont donné les définitions suivantes :

- La *pression de gonflement* d'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme la pression sous laquelle l'imbibition du milieu ne provoque pas de déformations de gonflement ni d'effondrement. Autrement dit, elle correspond à l'état de contrainte à exercer pour maintenir le volume de sol constant pendant l'imbibition, sans distorsion.
- Le *gonflement libre* d'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque l'imbibition d'un sol soumis à un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.
- Le *potentiel de gonflement* est défini par une relation entre contraintes et déformations de gonflement, cette déformation étant la valeur maximum obtenue au bout d'un temps infini sous contrainte totale constante. Le taux de gonflement est souvent exprimé par le rapport entre la variation de hauteur enregistrée lors de l'humidification et la hauteur initiale ($\Delta h/h_0$).

Cependant, il n'existe pas de procédure universelle de détermination de ces paramètres et différentes procédures d'essais appliquées à un même matériau conduisent en particulier, à des pressions de gonflement différentes (Sridharan et al., 1986).

7.2 Caractérisation au laboratoire

Al-Rawas (1999) a regroupé les méthodes disponibles, pour estimer le potentiel de gonflement, en trois catégories : méthodes empiriques, méthodes de consolidation et méthodes de succion. Cependant, on peut aussi regrouper ces méthodes en méthodes directes et méthodes indirectes.

7.2.1 Caractérisations indirectes

La caractérisation indirecte de l'aptitude au gonflement est le plus souvent réalisée à partir de relations empiriques qui prennent appui sur des paramètres géotechniques et physicochimiques classiques tels que la teneur en eau naturelle, la densité sèche, les limites d'Atterberg, le pourcentage des argiles (sens granulométrique : taille des particules < 2 µm), le pourcentage et la nature des minéraux argileux, la valeur de bleu de méthylène, l'activité des sols fins, la surface spécifique, la capacité d'échange de cations, etc.

Tableau 7.2.1 : Classification du potentiel de gonflement des sols argileux selon différents auteurs

<i>Altmeyer (1955)¹</i>	<i>Chen (1975)¹</i>	<i>Ranganatham et Satyanarayana (1965)¹</i>	<i>Chassagneux et al (1995)</i>		<i>Potentiel de Gonflement</i>
W _r (%) >12	WL (%) < 30	0 < I _r (%) < 20	I _p (%) < 12	VB < 2,5	Faible
10 < W _r < 12	30 - 40	20 < I _r < 30	12 < I _p < 25	2,5 ≤ VB < 6	Moyen
W _r < 10	40 - 60	30 < I _r < 60	25 < I _p < 40	6 ≤ VB < 8	Fort
	> 60	I _r > 60	I _p ≥ 40	VB ≥ 8	Très fort

<i>BRE(1980)¹</i>		<i>Holtz & Gibbs (1956)</i>			<i>Holtz et al (1973)¹</i>			<i>Potentiel de gonflement</i>
<i>I_p (%)</i>	<i>% < 2 µm</i>	<i>(%) < 0.001 mm</i>	<i>I_p (%)</i>	<i>W_r(%)</i>	<i>W_L(%)</i>	<i>I_p (%)</i>	<i>W_r(%)</i>	
< 18	< 30	< 17	< 20	> 13	20 à 35	< 18	> 15	faible
18 à 22	30 à 60	12 à 27	12 à 34	8 à 18	35 à 50	15 à 25	10 à 15	moyen
22 à 35	60 à 95	18 à 37	23 à 45	6 à 12	50 à 70	25 à 35	7 à 12	fort
> 35	> 95	> 27	> 32	< 10				très fort

VB : Valeur de bleu de méthylène ; ¹ cité par Vincent et al. (2006)

d'après Gromko, 1974				Granulométrie		Gonflement		<i>Potentiel de gonflement</i>
Limites d'Atterberg								
WL (%)	I _p (%)	W _r (%)	I _r (%) ^a	% < 1µm	% < 75µm	Taux de gonflement (TD1)* (%)	Taux de gonflement (S)** (%)	
<30	<18	> 15	0 à 20	<15	< 30	<10	< 1,5	faible
30à40	15à28	10 à 16	20 à 30	13 à 23	30 à 60	10 à 20	1,5 à 5	Moyen
40à60	25à41	7 à 12	30 à 60	20 à 33	60 à 95	20 à 35	5 à 25	Fort
>60	>35	< 11	> 60	>28	> 95	>35	>25	Très fort

*TD1 : taux de gonflement d'un échantillon séché à l'air, serti latéralement, mis en présence d'eau sous une charge de 6,9 kPa.

**S : taux de gonflement d'un échantillon, serti latéralement, mis en présence d'eau sous une surcharge de 6.9 kPa (1 psi). Compacté préalablement à la teneur en eau optimale et à la densité maximale selon AASHTO. S est estimé en fonction de l'indice de plasticité I_p des sols contenant entre 8 % et 65 % d'argile, par la relation $S = 21,6 \cdot 10^6 \cdot (I_p)^{2,44}$

^a : pour les sols naturels compactés à l'optimum et sous une charge de 6,9 kPa, le taux de gonflement est déterminé à partir d'une relation donnée par $S = 41,13 \cdot 10^{-5} (I_R)^{2,67}$ (Ranganatham et Satyanarayana, 1965, d'après Parcevaux, 1980).

Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques d'un matériau, l'emploi de formules empiriques permet d'estimer rapidement le potentiel de gonflement du terrain, c'est-à-dire de qualifier ce potentiel de faible, de moyen ou d'élevé.

Les limites d'Atterberg, la limite de retrait, la teneur en eau, la densité sèche sont des facteurs très pertinents pour estimer la sensibilité au gonflement des argiles.

Une identification primaire, à partir des résultats de ces essais géotechniques, peut présenter un intérêt considérable. La littérature contient un nombre important d'approches empiriques qui permettent d'appréhender le potentiel de gonflement des sols. La plupart d'entre eux s'appuient sur les limites d'Atterberg w_L , w_P et w_s déterminées en laboratoire, où w_L est la limite de liquidité, w_P est la limite de plasticité, w_s est la limite de retrait. Le Tableau 7.2.1 récapitule un grand nombre de ces approches. Cependant Seed et al. (1962) ont souligné que ces analyses sont le plus souvent fondées sur un nombre de données expérimentales assez faible et fournissent des corrélations approximatives entre les caractéristiques géotechniques citées et le gonflement.

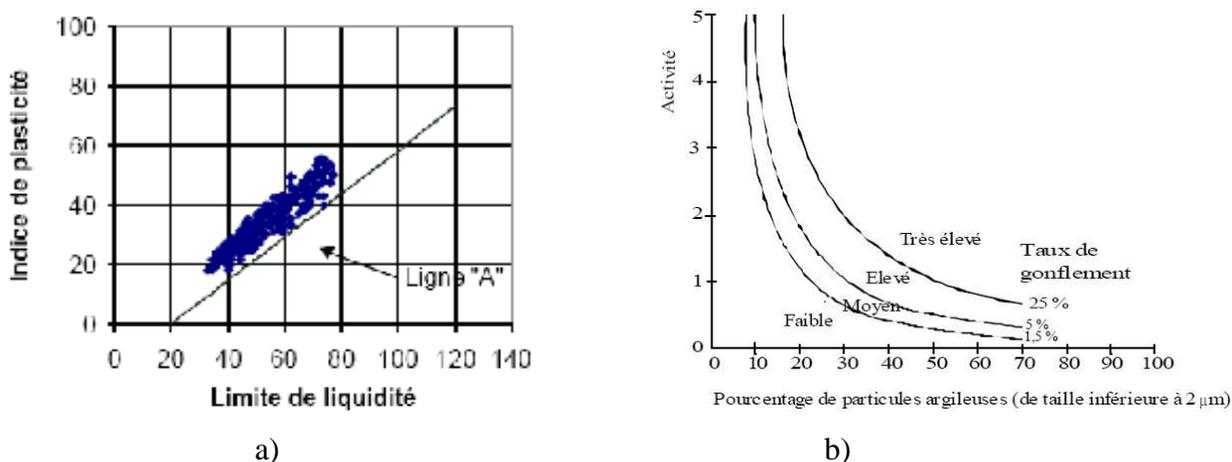


Figure 7.2.1 : a) Caractérisation des sols gonflants (d'après Vijayvergiya et Ghazzaly, 1973 dans Parcevaux, 1980) ; b) Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al., 1962)

Vijayvergiya et Ghazzaly (1973) ont constaté que la ligne « A » définie par Casagrande (1948) dans le diagramme de plasticité, d'équation : $I_p = 0,73 (W_L - 20)$ sépare les sols gonflants (au-dessus de la ligne « A ») des sols non gonflants (en dessous de la ligne « A ») comme indiqué sur la Figure 7.2.1. Cependant une argile se situant au dessus de la ligne « A » n'est pas nécessairement gonflante, puisque des sols mous peuvent parfois y être classés.

Le diagramme de classification du potentiel de gonflement proposé par Seed et al., (1962) est présenté dans la Figure 7.2.1.

Par ailleurs, Mc Keen (1992) a proposé une classification des sols gonflants (Tableau 7.2.2, et Figure 7.2.2) en se basant sur la pente de la courbe de rétention d'eau ($\Delta S/\Delta w$) et l'index de compression de succion C_h qui peut être estimé par une simple relation :

$$C_h = - 0,027 (\Delta S/\Delta w) - 0,39$$

Tableau 7.2.2 : Paramètres hydriques et potentiel de gonflement (d'après Mc Keen, 1992)

Catégorie	$\Delta S/\Delta w$	C_h	Potentiel de gonflement
I	> -6	$-0,227$	Très fort
II	$-10 < \Delta S/\Delta w < -6$	$-0,227 < C_h < -0,120$	Fort
III	$-13 < \Delta S/\Delta w < -10$	$-0,120 < C_h < -0,040$	Moyen
IV	$-20 < \Delta S/\Delta w < -13$	$> -0,040$	Faible
V	< -20	Non gonflant	Non gonflant

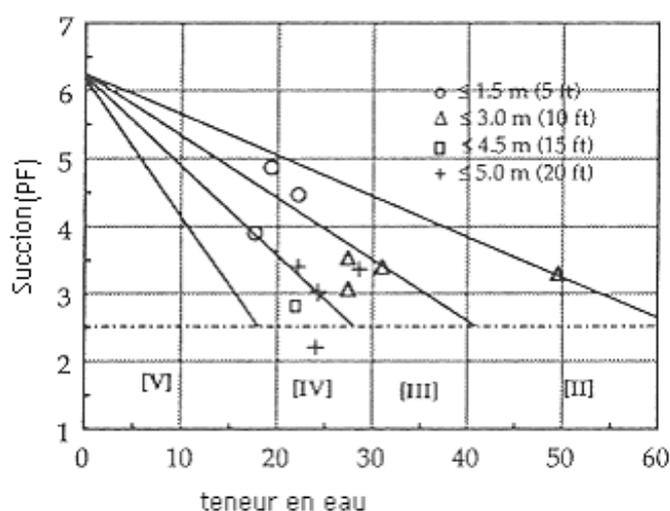


Figure 7.2.2 : Classification des sols gonflants (d'après Mc Keen, 1992)

Etant acquis que la méthode de compactage est un facteur très influant sur les paramètres de gonflement, Komornik et David (1969) ont travaillé plus particulièrement sur des sols non remaniés, provenant d'Israël. Les nombreux essais réalisés ont montré qu'une simple corrélation linéaire était possible entre le gonflement libre et l'indice de plasticité avec une fourchette d'erreur d'environ 25 % :

$$\begin{aligned} \varepsilon_g &= 6,7 + 2,4 I_p && \text{pour les marnes} \\ \varepsilon_g &= 0,9 + 2,1 I_p && \text{pour l'argile} \end{aligned}$$

En conclusion, ces méthodes restent le plus souvent approximatives et différencient seulement les sols à fort potentiel de gonflement des sols à faible potentiel de gonflement. Il faut aussi remarquer que ces différentes méthodes ne permettent pas d'obtenir des résultats toujours compatibles entre eux comme il a été démontré par différents auteurs comme Sneath (1984) et Josa (1988, d'après Bultel, 2001). Ainsi, il est difficile de classer les sols gonflants uniquement à partir de la valeur d'un indice tirée d'une mesure indirecte de reconnaissance. De plus, il faut souligner que les relations sont en général déterminées à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui d'échantillons naturels. Par conséquent, ces méthodes indirectes de caractérisation du gonflement sont certes très utiles en tant qu'indicatrices du potentiel de gonflement lors d'études statistiques sur des sols très différents, mais en aucun cas elles ne peuvent remplacer les mesures expérimentales directes

du gonflement lorsqu'on s'intéresse à un sol particulier comme l'a remarqué Parcevaux (1980).

7.2.2 Modèles d'estimation du gonflement - Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes consistent à établir une corrélation entre le taux de gonflement ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques faciles à obtenir au laboratoire. Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques du sol, l'emploi de formules empiriques permet d'estimer rapidement le potentiel de gonflement du sol, c'est-à-dire d'estimer ou de quantifier le gonflement et (ou) la pression de gonflement qui peuvent se développer en cas de variations des conditions hydriques et (ou) mécaniques.

De nombreux auteurs ont tenté de relier la pression de gonflement σ_g , ou le potentiel de gonflement ε_g , aux paramètres classiques de mécanique des sols (teneur en eau initiale w_i , densité sèche initiale γ_{d0} , limite de liquidité w_L , indice de plasticité I_p , limite de retrait w_s , pourcentage des particules d'argiles $< 2\mu m$, ...) qui semblent être les facteurs les plus influents sur le gonflement des argiles. Plusieurs relations empiriques ont été proposées. Quelques exemples sont donnés dans le Tableau 7.2.3.

Tableau 7.2.3 : Modèles d'estimation du taux de gonflement (ε_g) et de la pression de gonflement (σ_g)

<i>Modèles empiriques</i>	<i>Expression mathématique</i>
Taux de gonflement (ε_g)	
Nayak et Christensen* (1971)	$\varepsilon_g = 0.0229(IP)^{1.45} \frac{C2}{w_o} + 6,38$
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973)	$\lg(\varepsilon_g) = \frac{1}{19,5} (6,242\gamma_d + 0,65 w_L - 130,5)$ $\lg(\varepsilon_g) = \frac{1}{12} (0,4w_L - w_o + 5,5)$
Brackley (1975)	$\varepsilon_g = (5,3 - \frac{147e_0}{I_p} - \lg(p)) \cdot (0,525I_p + 4,1 - 0,85w_o)$
Johnson et Snethen (1978)	$\log \varepsilon_g = 0,458 + 0,036 w_L - 0,0833 w_i$
Weston (1980)	$\varepsilon_g = 4,11 \cdot 10^{-4} (w_{LL})^{4,17} (p)^{-0,386} (w_o)^{2,33} ; \text{où}$ $w_{LL} = w_L \left(\frac{\% < 40\mu m}{100} \right)$
Yilmaz (2006)	$\varepsilon_g = 0,155 w_L - 0,00763 CEC - 2,04$
Pression de gonflement (σ_g)	
Nayak et Christensen* (1971)	$\sigma_g (t / m^2) = 0,035817 \cdot (Ip)^{1,12} \left(\frac{C2}{w_o} \right)^2 + 3,7912 ;$ <p style="text-align: center;">méthode à volume constant</p>

Vijayvergiya et Ghazzaly (1973)	$\lg(\sigma_g) = \frac{1}{19,5} (6,242\gamma_d + 0,65 w_L - 139,5)$ $\lg(\sigma_g) = \frac{1}{12} (0,44w_L - w_o - 0,4)$ $\sigma_g \text{ (t/m}^2\text{), méthode à volume constant}$
Brackley (1975)	$\lg(\sigma_g) = (5,3 - \frac{147e_0}{Ip}) \quad \sigma_g \text{ en kPa}$

*cités par Zein 1987

I_p : indice de plasticité, C_2 : % < 2 μ m, w_o : teneur en eau, γ_d : poids volumique sec ($kN.m^{-3}$), p : contrainte normale (kPa), e_0 : indice de vide, CEC : capacité d'échange cationique (meq/100g)

7.2.3 Essais de caractérisation directe du gonflement au laboratoire

Il existe une multitude de procédures d'essais de gonflement (synthèse de Serratrice et Soyez, 1996) ; Cependant, trois techniques sont le plus souvent citées dans la littérature : l'essai de gonflement libre, l'essai de gonflement à différentes charges constantes et l'essai de gonflement à volume constant.

L'oedomètre traditionnel reste l'appareillage préconisé par les instances de normalisation internationale pour la réalisation des essais de gonflement. Les différentes procédures sont basées sur des essais par paliers et non par chargement continu, avec imbibition sans utilisation d'une contre-pression (mise en imbibition et non pas en saturation), d'après Serratrice et Soyez (1996).

Les trois méthodes ont été décrites, entre autres auteurs, par Serratrice et Soyez (1996), Bigot et Zerhouni (2000) et font l'objet de normes : Méthode à gonflement libre ASTM D 4546-90 (1990, Méthode A), Méthode sous charge constante (essais en parallèle), AFNOR NF XP 94-091 (1995) et ASTM D 4546-90 (1990, méthode B), et Méthode à volume constant, ASTM D 4546-90 (1990, méthode C).

7.2.3.a *Méthode à gonflement libre (ou méthode d'hydratation sous chargement nul)*

Après montage d'une éprouvette dans une cellule œdométrique, celle-ci est soumise au processus d'imbibition sous une charge correspondant au poids du piston. Les déformations verticales sont mesurées, la déformation maximale rapportée à la hauteur initiale correspond au potentiel de gonflement. Une fois le phénomène de gonflement stabilisé, le chargement s'effectue de manière progressive par paliers, selon un taux de chargement choisi. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale (Figure 7.2.3, méthode 1). Cette méthode n'existe pas dans la norme AFNOR.

7.2.3.b *Méthode sous charge constante (Essais en parallèle ou méthodes d'hydratation sous charge constante)*

Cette méthode consiste à placer plusieurs éprouvettes, au moins quatre selon la norme AFNOR XP 94-091 (1995), d'un même matériau dans des cellules œdométriques. Chaque éprouvette à l'état naturel, fait l'objet d'un chargement jusqu'à une contrainte axiale choisie en fonction d'un taux d'accroissement des charges préalablement défini. La pression verticale

à appliquer doit être différente pour chacun des échantillons (Figure 7.2.3, méthode 2). Le gonflement ou le tassement de chaque éprouvette est obtenu en procédant à son imbibition sous contrainte, jusqu'à stabilisation des déformations. La courbe $\Delta h/h_i$, fonction de la pression appliquée, est tracée. Une interpolation linéaire est réalisée entre les différents points pour estimer la pression pour laquelle le gonflement est nul. Elle correspond à la pression de gonflement. Les normes AFNOR et ASTM (méthode B) diffèrent cependant, sur le mode d'application de la charge verticale. Dans la norme AFNOR une stabilisation des déformations est nécessaire avant de débiter l'imbibition, alors que dans la procédure ASTM (méthode B), la charge appliquée est suivie de l'imbibition 5 mn après.

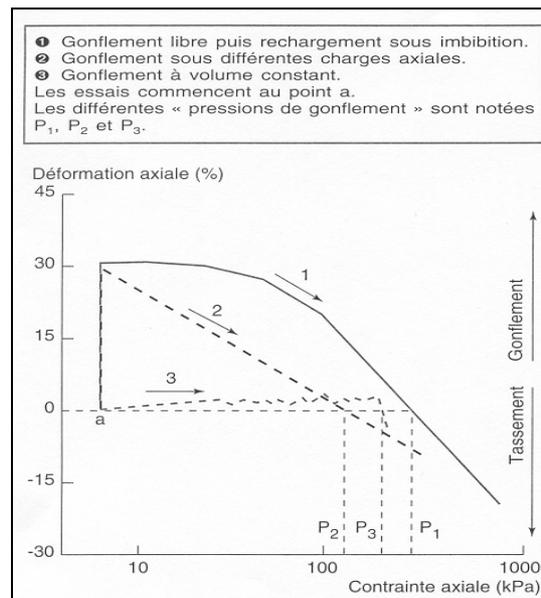


Figure 7.2.3 : Différentes méthodes d'essais de gonflement (d'après Sridharan et al., 1986)

Cette méthode présente l'avantage de soumettre le sol à des conditions proches de la réalité, chaque éprouvette étant un élément représentatif du massif de sol. Cependant, elle présente l'inconvénient d'avoir à tester simultanément des éprouvettes de matériaux présentant une certaine hétérogénéité (sols naturels en général). Il est dans ce cas difficile de définir la pression de gonflement

7.2.3.c Méthode à volume constant (ou méthodes d'hydratation à gonflement empêché)

Le principe de cette méthode est de procéder à l'imbibition d'une éprouvette, tout en maintenant son volume constant (Figure 7.2.3, méthode 3). Au cours de cet essai, contrairement à la procédure du gonflement libre, la structure du sol est supposée ne pas trop évoluer. Cet essai ne fait pas l'objet d'une norme AFNOR. Selon la norme ASTM (méthode C), l'échantillon est soumis, avant l'humidification, à une pression verticale voisine des conditions in situ ou d'une pression de gonflement estimée. Les déformations verticales sont empêchées en augmentant progressivement la charge appliquée. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant est la pression de gonflement.

Toutes ces méthodes ne donnent pas les mêmes valeurs de pression de gonflement. Ainsi, afin d'identifier celle qui serait la plus cohérente avec les valeurs mesurées in-situ, de nombreux auteurs, dont Sridharan et al. (1986), ont appliqué ces différentes méthodes à des sols identiques. Pour des sols composés de montmorillonite, ils ont noté que :

- la méthode du gonflement libre, ayant libérée tout son potentiel de gonflement, surestime la pression de gonflement ;
- la méthode par chargement de plusieurs éprouvettes donne une valeur inférieure ;
- la méthode du gonflement à volume constant donne une valeur intermédiaire (ou moyenne).

Ces mêmes auteurs ont aussi montré que, suivant le chemin de contraintes suivi au cours du gonflement, les valeurs de pression de gonflement obtenues peuvent être différentes. La pression de gonflement n'est donc pas une grandeur intrinsèque du matériau mais dépend fortement du chemin de chargement.

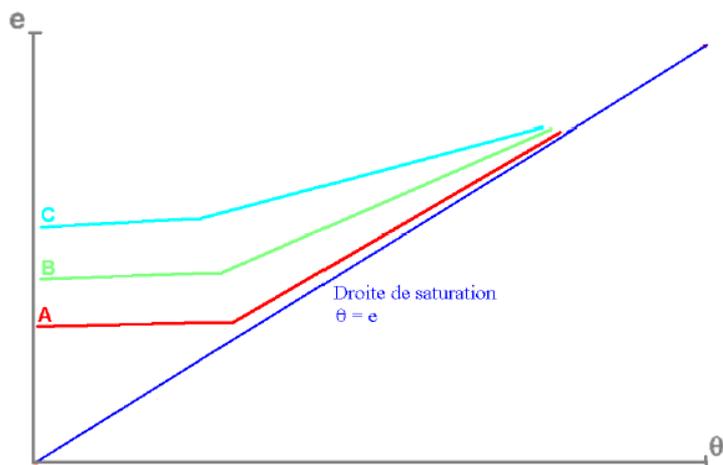
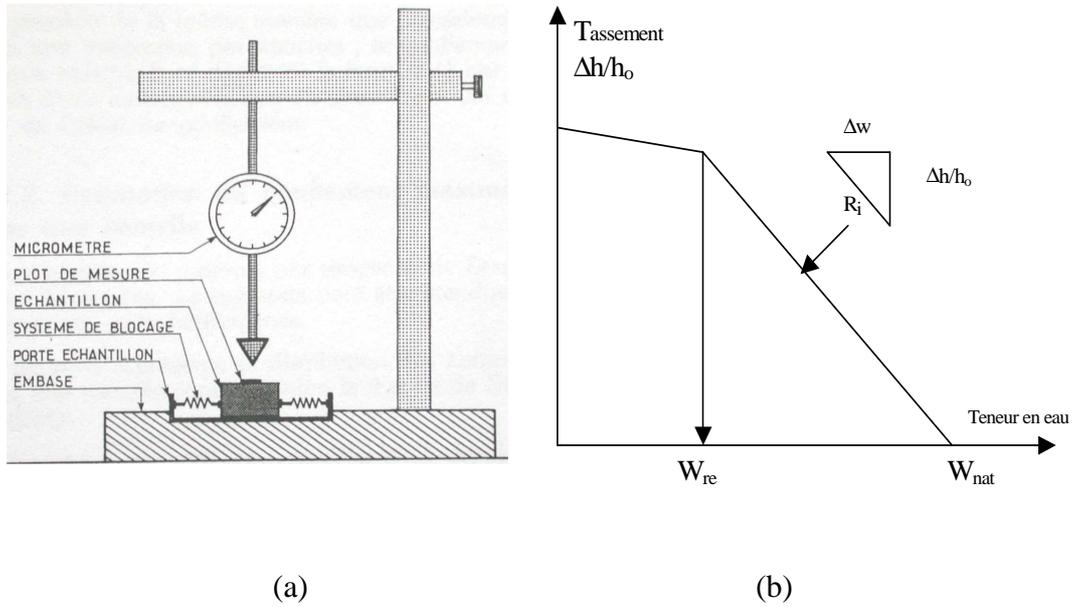
D'autres méthodes de détermination de la pression de gonflement ont été mises au point durant ces 15 dernières années, la plupart dérivent des protocoles classiques améliorés par des moyens de contrôle automatiques, certaines mesurent le gonflement volumique à partir d'essais au triaxial.

7.2.4 Etude du retrait au laboratoire

Le paramètre normalement utilisé pour caractériser le retrait d'un sol est la limite de retrait ou la limite de retrait effective. Comme il a été défini précédemment, la limite de retrait d'un sol correspond à la teneur en eau à partir de laquelle un sol commence à se désaturer. Son estimation est basée sur la courbe de retrait qui exprime la diminution de volume en fonction de la diminution de la teneur en eau. C'est une limite conventionnelle qui sépare le comportement du sol en deux domaines : un domaine avec variation importante de volume, d'un domaine avec variation de volume quasiment nulle. Selon la norme AFNOR (d'après Bigot et Zerhouni, 2000), il existe deux types d'essais de limite de retrait : la limite de retrait conventionnelle sur le passant à 400 μm d'un matériau et la limite de retrait effective sur un sol non remanié. Dans le premier cas, l'essai consiste à déterminer la perte de volume d'une éprouvette de sol remanié, entre l'état initial liquide (teneur en eau supérieure à la limite de liquidité) et l'état sec.

Dans le deuxième cas, l'essai consiste à laisser se dessécher librement et progressivement une éprouvette de sol posée sur un plateau de la balance et à mesurer périodiquement sa variation de hauteur et sa masse (Figure 7.2.4 a). On trace alors la courbe $\Delta h/h_i$ en fonction de la teneur en eau lors du drainage et on détermine ainsi les variations dimensionnelles du sol entre l'état naturel initial et un état de dessiccation donné (Philopponnat 1991), (Figure 7.2.4b) ou W_{re} est la limite de retrait effective, W_{nat} la teneur en eau naturelle et R_i le facteur de retrait effectif ou retrait linéaire).

Il faut noter que la taille de l'échantillon a une influence sur la pente de la courbe de retrait (Figure 7.2.4c). Plus on considère un petit échantillon de sol argileux, plus la courbe de retrait obtenue a une pente forte. Ceci peut s'expliquer par le fait que, plus le volume de sol considéré est important, plus la probabilité qu'il présente de la macroporosité est forte. Il faut donc lui apporter de grandes quantités d'eau pendant son humidification avant qu'il n'atteigne sa droite de saturation. Au contraire, quand on considère un petit échantillon, les pores qui sont présents se trouvent essentiellement dans la matrice argileuse du sol. Cette dernière est saturée en permanente et la microporosité n'est que très difficilement drainée. De ce fait le comportement est proche de la droite de saturation (forte pente de la courbe de retrait, Figure 7.2.4 c).



A : Echantillon de petite dimension (echelle de la matrice solide microscopique)
 B : Echantillon de dimension moyenne (echelle mesoscopique)
 C : Echantillon de grande dimension (echelle macroscopique)

(c)

Figure 7.2.4 : a) Principe de l'essai de retrait linéaire (Phlipponnat, 1991) ; b) Détermination de la limite de retrait effective (d'après Bigot et Zerhouni, 2000) c) Influence de la taille des échantillons sur la pente de retrait (d'après Tessier et al, 2006)

8 Caractérisation hydrique des sols au laboratoire - courbes imbibition-drainage

Les courbes imbibition-drainage sont obtenues par différentes méthodes en fonction de la succion appliquée. Actuellement, il existe de nombreuses procédures pour mesurer ou imposer la succion. Cependant, aucune d'elles ne permet de balayer toute la gamme des valeurs de succion rencontrées dans les sols (Delage et al, 1998). De plus, chacune d'entre elles n'est applicable que sous certaines conditions. On peut généralement les regrouper en deux catégories : méthodes de mesure directe et méthodes d'imposition. Dans le premier cas, elles permettent de mesurer la succion directement : méthodes du tensiomètre, du psychromètre, du papier filtre, etc. Dans le deuxième cas, les méthodes consistent à imposer ou maintenir une succion prédéterminée : méthode osmotique, méthode de surpression d'air, et méthode de l'humidité relative contrôlée en utilisant les solutions salines saturées. Le Tableau 7.2.1 montre la gamme de mesure ou d'imposition de la succion pour chacune de ces méthodes.

Tableau 7.2.1 : Méthodes de mesure ou d'imposition de la succion (d'après Ridley et Wray, 1995, modifié)

<i>Dispositifs / méthodes de mesure ou d'imposition de la succion</i>		<i>Composante de la succion mesurée</i>	<i>Gamme de mesure (kPa)</i>	<i>Temps nécessaire pour l'équilibrage</i>
Psychromètre	à thermocouple	totale	100 à 7500	des minutes
	à transistor	totale	100 à 71000	des minutes
Papier-filtre	en contact avec le sol	matricielle	100 à 30000	une semaine
	sans contact	totale	400 à 30000	une ou deux semaine (s)
Pierre poreuse		matricielle	30 à 3000	des semaines
Capteur de conductivité thermique		matricielle	0 à 300	des semaines
Plaque de succion		matricielle	0 à -90	des heures
Plaque tensiométrique		matricielle	0 à 1500	des heures
Tensiomètre	standard (à eau)	matricielle	0 à -100	des minutes
	osmotique	matricielle	0 à 1500	des heures
	IC	matricielle	0 à -1800	des minutes
Méthode osmotique*	avec du PEG 20000	matricielle	0 à 6300	des semaines
	avec du PEG 1500	matricielle	0 à 12600	
	avec du PEG 6000/4000	matricielle	0 à 9000	
Méthodes des solutions salines**		totale	6000 à 1000000	des semaines

* - d'après Delage et al, 1998; **- d'après Cuisinier, 2002

Pour les faibles succions, la technique des plaques tensiométriques (succion inférieure à 1 ou 1,5 MPa) et la technique osmotique (succion inférieure à 6 MPa) sont appliquées couramment. Au-delà de ces valeurs la technique par phase vapeur est utilisée.

Un bref résumé des méthodes, que nous avons utilisées pour cette étude, est présenté.

8.1 Papier filtre

La méthode du papier filtre reste la plus simple pour déterminer des succions allant jusqu'à 30 MPa. (Tableau 7.2.1). Elle nécessite cependant d'établir, au préalable, la courbe de

rétenion du papier utilisé. La méthode consiste à insérer une triple épaisseur de papier-filtre dans l'éprouvette dont on veut déterminer la succion et à attendre l'équilibre des succions entre le sol et le papier-filtre, en évitant toute évaporation. On extrait ensuite les papiers-filtres de l'éprouvette et l'on détermine la teneur en eau de la feuille centrale, non polluée, par une pesée au 1/10 000^e. La connaissance de la teneur en eau et de la courbe de rétenion d'eau du papier filtre permet d'accéder à sa succion et donc à celle du sol. La Figure 8.1.1 présente les courbes obtenues en chemin de drainage (Parcevaux 1980) et de remouillage (Fawcett et Collis-George, 1967, d'après Cui et Delage, 2003) pour le papier Whatman n°42, très fréquemment utilisé. Par cette méthode il est possible de déterminer la succion totale, matricielle et osmotique d'un échantillon (Ridley et Wray, 1996). La précision des résultats dépend toutefois de la qualité de l'étalonnage du papier filtre. Cette méthode à été choisie pour mesuré la succion naturelle lors du prélèvement des échantillons.

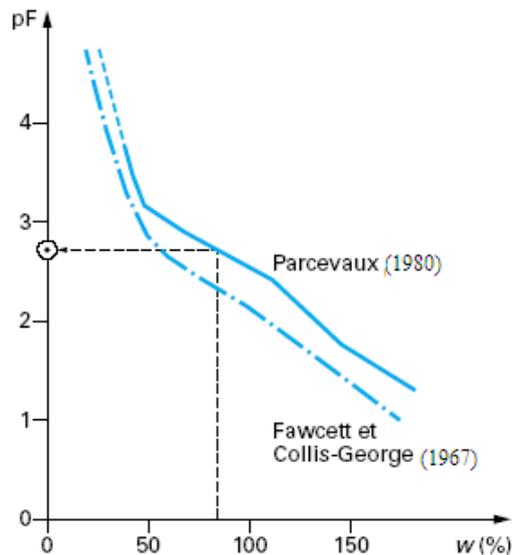


Figure 8.1.1 : Courbe d'étalonnage du papier-filtre Whatman n° 42 sec et humide (d'après Delage & Cui, 2000)

8.2 Méthode de contrôle osmotique

La méthode osmotique permet d'imposer de faibles succions en utilisant des solutions aqueuses de molécules organiques de grandes tailles de polyéthylène glycol (PEG) en contact avec la solution du sol par l'intermédiaire d'une membrane (de dialyse) semi-perméable. Cette membrane semi-perméable, induit des flux de molécules d'eau, suivant la loi de Van Hoff, de la solution ayant l'énergie la plus forte vers la solution ayant l'énergie la plus faible. Comme l'eau peut traverser la membrane alors que les molécules de PEG en solution ne le peuvent pas du fait de leur grande taille, un échantillon mis au contact d'une membrane semi-perméable derrière laquelle circule une solution de PEG, est soumis à une succion osmotique d'autant plus forte que la concentration en PEG est élevée. La relation $s = 11.c^2$ reliant la succion (en MPa) à la concentration de PEG (en g PEG par g d'eau), déterminée par Williams et Shaykewich en 1969 pour des succions allant jusqu'à 1,44 MPa, a été vérifié en 1998 par Delage et al. et étendue jusqu'à 12 MPa (Figure 8.2.1a).

La méthode consiste à placer l'échantillon, entouré d'une membrane osmotique cylindrique, dans un bain de solution de PEG posé sur un agitateur magnétique (Figure 1.2.1b). Des

élastiques placés autour de l'échantillon de sol assurent un bon contact entre le sol et la membrane. Les transferts d'eau se font au travers de la membrane.

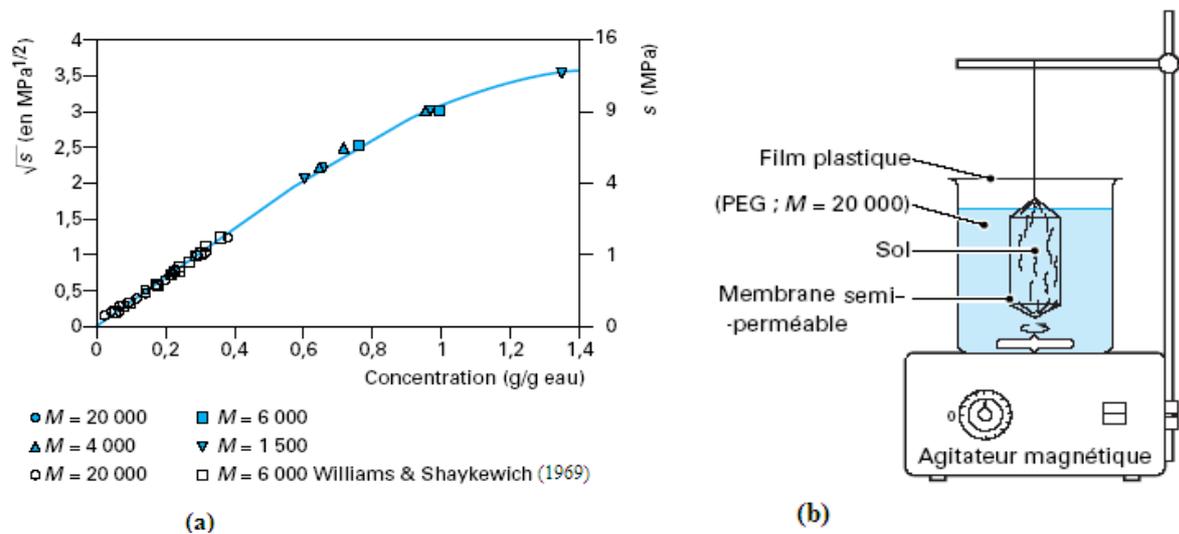


Figure 8.2.1 : a) Relation entre succion et concentration de PEG ; b) Mise en œuvre de la technique osmotique (Delage & Cui, 2000)

Le temps d'équilibrage dépend du type de sol, de la concentration et de la taille de l'échantillon. Une fois l'équilibre atteint, on extrait l'échantillon pour le peser et déterminer la teneur en eau. On répète la procédure en passant au palier de succion suivant. On s'assure que la concentration reste constante au cours des échanges, car elle peut varier légèrement (évaporation, pertes).

8.3 Méthode de contrôle par phase vapeur

Cette méthode est basée sur la loi de Kelvin. Elle consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée, à humidité contrôlée. Les transferts d'eau s'effectuent sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre, ce qui est en général assez long. La durée dépend de la taille de l'échantillon et de la valeur de succion imposée. L'humidité relative peut être imposée en plaçant dans le dessiccateur une solution d'acide sulfurique à concentration donnée ou une solution saline saturée (Figure 8.3.1).

Cependant, du fait de la difficulté de dosage des solutions d'acide sulfurique et du danger qu'elles présentent, des solutions salines saturées permettant d'imposer de très fortes succions sont utilisées dans la pratique. La présence de sel au fond de ces solutions joue le rôle de tampon chimique, stabilisant l'équilibre entre les trois phases et de ce fait stabilisant l'humidité relative imposée.

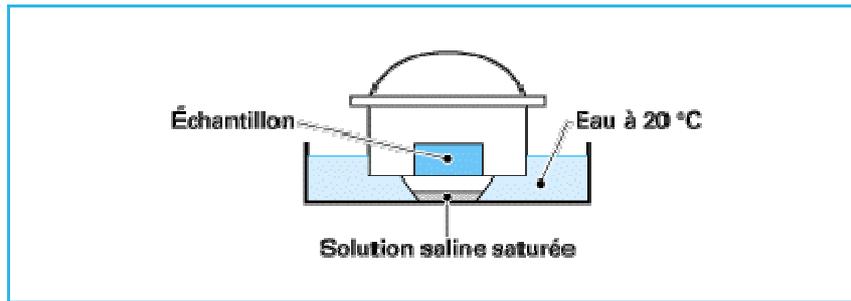


Figure 8.3.1 : Contrôle de succion par phase vapeur (Delage & Cui, 2000)

La succion imposée étant variable avec la température (loi de Kelvin), il est préférable d'utiliser cette technique en condition de température contrôlée. Pour ce faire, on place l'ensemble, dessiccateur et solution saline saturée, dans un bain à température constante. Il faut s'assurer que la condensation de gouttes d'eau ne se forme pas sur les parois du dessiccateur car ces gouttes peuvent tomber sur les échantillons, retardant ainsi l'atteinte de l'équilibre. Le Tableau 8.3.1 donne les valeurs de succion obtenues avec différents sels (Delage & Cui, 2000).

Tableau 8.3.1 : Relation humidité relative - succion (Delage & Cui 2000)

Sel	Succion (MPa)	Humidité relative (%)
K_2SO_4	4,2	97
$ZnSO_4, 7H_2O$	12,6	91,3
$(NH_4)_2SO_4$	29	81
NaCl	37,8	76
$NaNO_2$	57,3	66
$Mg(NO_3)_2$	82,4	55
K_2CO_3	137,8	44
KCH_3CO_2	182,1	20
KOH	331,9	9

En conclusion ces méthodes permettent d'imposer différents paliers de succion aux échantillons, de ce fait d'étudier leur comportement et de déterminer la courbe de rétention des sols.

9 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la complexité du phénomène de gonflement, qui fait intervenir plusieurs mécanismes physiques, chimiques et mécaniques, d'interaction du matériau et de l'eau, à différentes échelles. La cohésion interfeuillet est un facteur prépondérant du processus de retrait-gonflement. Il est également avéré que la structure du matériau (arrangement des particules, fissuration, etc.) conditionne le processus de gonflement, d'une part, et que le processus de gonflement est lui-même accompagné, dans certains cas, de modifications structurales (réarrangement des particules, compensation de vides, etc.), d'autre part.

Le modèle de la double couche est un modèle de base, il explique les phénomènes du retrait-gonflement à l'échelle microscopique et permet d'apprécier les effets, de la concentration de l'électrolyte, de la constante diélectrique, de la valence cationique, et de la température, même s'il reste limité par les hypothèses émises sur le milieu. A l'échelle microscopique, le gonflement est d'autant plus fort que la surface spécifique de l'argile est grande, que la concentration en sel dans l'eau interstitielle est faible et que la valence des cations échangeables est faible. L'application du modèle de la double couche semble être satisfaisant quand la source du gonflement est la pression de répulsion osmotique, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de sols sursaturés en cations monovalents, en présence d'un soluté à faible concentration ionique. Dans le cas d'un sol argileux, où la texture et la structure ne sont pas homogènes, l'applicabilité de ce modèle est discutable.

En plus des facteurs intrinsèques, le processus de retrait-gonflement est influencée par les paramètres d'état que sont la teneur en eau, la densité, l'indice des vides et la succion. Ces différents facteurs montrent qu'il est difficile de corrélérer un comportement macroscopique à des observations microscopiques. On a constaté que pour une teneur en eau donnée, le potentiel de gonflement augmente d'autant plus que la densité sèche est élevée, et que pour une densité sèche donnée, le potentiel de gonflement augmente lorsque la teneur en eau diminue. L'influence de la densité sèche et l'influence de la teneur en eau, sur le potentiel de gonflement, sont donc couplées.

Le taux et la pression de gonflement des sols augmentent lorsque la densité sèche initiale augmente et lorsque la teneur en eau initiale diminue.

Le taux de gonflement varie de façon inverse à la pression verticale exercée.

L'analyse bibliographique a permis de constater que seules les analyses minéralogiques et chimiques ne permettaient pas d'interpréter toutes les manifestations macroscopiques du gonflement, l'arrangement des particules, c'est à-dire la texture/structure a aussi une influence importante sur le gonflement.

Le processus de gonflement s'accompagne également de modifications structurales : une augmentation de la porosité en taille et en volume au cours de l'hydratation du matériau naturel par ouverture progressive de la porosité inter et intra-agrégat primaire est observée.

Des auteurs ont montré que sous l'effet répété de cycles de séchage partiel et d'imbibition totale, les sols présentent des signes de fatigue. Le potentiel de gonflement, diminue progressivement au cours des cycles et se stabilise au bout de quatre ou cinq cycles. Un phénomène d'agrégation des particules se produit au cours des cycles et conduit à un arrangement des particules moins sensible à l'absorption des molécules d'eau. L'effet

contraire est observé lorsque l'argile est complètement desséchée en dessous de sa limite de retrait.

Les méthodes indirectes de caractérisation, basées sur l'identification géotechnique des matériaux, sont très utiles en tant qu'indicateurs du potentiel de gonflement des sols, mais ne peuvent pas remplacer les essais, en laboratoire, de détermination des paramètres de gonflement, que sont la pression de gonflement ou le taux de gonflement. Ces méthodes indirectes sont, en général, déterminées à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui du matériau à l'état naturel. Les différents modèles de gonflement, établis chacun à partir d'un sol spécifique, doivent être utilisés avec beaucoup de précautions sur des sols de natures voisines.

En fin, Il faut souligner l'effet d'échelle entre l'échantillon et le massif. Un échantillon ne représentera jamais l'ensemble des couches géologiques qui interviennent dans la réponse en grand du massif.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

Voir page 195

Zemenu Geremew YIGZAW (2009) - Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques. Rôle de la microstructure.

La présence de plusieurs formations argileuses affleurantes ou sub-affleurantes en région parisienne classe cette région parmi les plus vulnérables au phénomène de retrait-gonflement. Deux formations sont plus particulièrement concernées : les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil. Ce mémoire est consacré à l'étude du comportement du retrait-gonflement de ces sols à partir d'une analyse menée au laboratoire, des caractéristiques minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydromécaniques. Les résultats obtenus mettent en évidence une différence de comportement entre les deux sols étudiés et soulignent l'importance de la présence et de la nature des minéraux argileux et de la texture du sol sur le phénomène de retrait-gonflement et sur les transformations microstructurales qui en découlent. Ils montrent aussi le rôle joué par les carbonates, la cimentation et les conditions initiales sur les sols intacts ou remaniés lors des échanges hydriques. Enfin, l'influence des cycles de séchage/humidification sur le comportement hydromécanique des sols étudiés a été analysée. Les résultats montrent qu'au cours des cycles successifs de sollicitations hydriques, alors que les échantillons de sol présentent une augmentation du taux de gonflement cumulé, une stabilisation des déformations de chacun des cycles est atteinte au bout du troisième ou quatrième cycle. Ces résultats sont en relation avec une réorganisation de la microstructure mise en évidence par l'analyse microstructurale (MEB, porosimétrie).

Mots-clés : Sols argileux, comportement retrait-gonflement, essais œdométriques, sollicitations hydriques cycliques, Argiles vertes de Romainville, Marnes bleues d'Argenteuil

Zemenu Geremew YIGZAW (2009) - Analysing clayey soil shrinkage-swelling processes due to cyclic hydric stresses. The role of the microstructure

The presence of several clay formations outcropping or sub-outcropping near Paris class this region among the most vulnerable to shrinkage-swelling. Two courses are particularly relevant: Clays Romainville green and blue marls of Argenteuil. This thesis is devoted to studying the behavior of the withdrawal-swelling of these soils from an analysis conducted in the laboratory, the mineralogy, microstructure, geotechnical and hydro. The results show a difference in behavior between the two soils studied and underline the importance of the presence and nature of clay minerals and soil texture on the shrinkage-swelling and microstructural changes that thereunder. They also show the role played by carbonates, cementation and the initial conditions on the land intact or rearranged during water exchange. Finally, the influence of cycles of drying / wetting behavior of hydro soils studied was analyzed. The results show that during the successive cycles of water stress, while the soil samples show an increase in the cumulative rate of inflation, stabilization of the deformations of each cycle is reached after the third or fourth round. These results are in connection with a reorganization of the microstructure revealed by microstructural analysis (SEM, porosimetry).

Keywords : clay soils, shrinkage-swelling behavior, oedometer tests, cyclic water stress, green clay Romainville, Marnes blue Argenteuil