
CONTRIBUTIONS D'ARMINES-CENTRE DE GEOSCIENCES

Roger Cojean, Martine Audiguier, Zemenu Geremew,
Saoussen Laribi, Isabelle Thénevin

Rapport final Fondation MAIF
ALEA ET RISQUE SECHERESSE
Armines – Centre de Géosciences,
coordonnateur
Janvier 2009



SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	15
2.	L'ALEA SECHERESSE EN ILE-DE-FRANCE	16
2.1	L'aléa sécheresse et les événements climatiques extrêmes dans le cadre du changement global. Le cas de l'Ile de France	16
2.1.1	<i>Les événements climatiques extrêmes de type sécheresse dans le cadre du changement climatique global</i>	16
2.1.2	<i>Analyse des données historiques</i>	16
2.1.3	<i>Analyse statistique</i>	19
2.1.4	<i>Utilisation des modèles numériques pour des simulations climatiques</i>	26
2.1.5	<i>Utilisation des situations météorologiques</i>	26
2.2	Synthèse tirée des travaux de cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement sur les départements de l'Ile-de-France.	28
2.2.1	<i>Le retrait-gonflement dans les sols argileux de l'Ile-de-France</i>	28
2.2.2	<i>Synthèses par département de l'Ile-de-France</i>	29
2.2.3	<i>Présentation des cartes d'aléa des 7 départements de l'Ile-de-France (site BRGM : www.argiles.fr)</i>	36
2.2.4	<i>Conclusion</i>	40
3.	LA CARTOGRAPHIE PPRN DU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX EN FRANCE, LA DEMARCHE DES EXPERTS D'ASSURANCE	43
3.1	Introduction	43
3.2	Les Plans de Prévention des Risques Naturels	43
3.3	L'assurance face aux dommages aux constructions liés à la sécheresse	49
3.3.1	<i>Le cadre général (d'après Toulemont M. et Cojean R., 2007)</i>	49
3.3.2	<i>L'intervention des experts d'assurance (d'après Roume C., 2007)</i>	52
4.	SYNTHESE DES RESULTATS RELATIFS AUX CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES, MICROSTRUCTURALES, GEOTECHNIQUES, HYDRIQUES ET MECANIQUES DES ARGILES VERTES DE ROMAINVILLE ET DES MARNES BLEUES D'ARGENTEUIL	57
4.1	Présentation	57
4.2	Caractérisation minéralogique	60
4.2.1	<i>Caractérisation minéralogique globale</i>	60
4.2.2	<i>Caractérisation minéralogique des profils des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'Est (Villeparisis-le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis)</i>	62
4.3	Caractérisation géotechnique	65
4.3.1	<i>Caractérisation géotechnique globale</i>	65
4.3.2	<i>Caractérisation géotechnique des profils des Argiles vertes de Romainville prélevées à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis) du bassin de Paris</i>	72
4.4	Fissuration	74
4.4.1	<i>Echantillons intacts</i>	74
4.4.2	<i>Echantillons remaniés</i>	76
4.4.3	<i>Conclusions</i>	78
4.5	Caractéristiques hydriques	78
4.6	Caractéristiques microstructurales	86
4.6.1	<i>Matériaux à l'état naturel lyophilisés</i>	86
4.6.2	<i>Argiles vertes de Romainville intacte et sous forme de colluvions argileuses</i>	87
4.6.3	<i>Comparaison du comportement microstructural de AVR et de MBA à l'état naturel et à l'état remanié au laboratoire, lors de la réhumectation</i>	88
4.7	Comportement mécanique des matériaux étudiés	90
4.7.1	<i>Protocoles d'essai</i>	90
4.7.2	<i>Résultats</i>	91
4.8	Gonflement libre sous sollicitations hydriques cycliques	97
4.9	Conclusions	100
4.9.1	<i>Minéralogie</i>	100
4.9.2	<i>Caractéristiques géotechniques</i>	101
4.9.3	<i>Caractéristiques hydriques</i>	101
4.9.4	<i>Fissuration</i>	101

4.9.5	<i>Caractéristiques microstructurales</i>	102
4.9.6	<i>Caractéristiques mécaniques</i>	102
4.10	Annexes.....	104
4.10.1	<i>Comparaison du comportement macroscopique d'échantillons de E-AVR-0 et de E-MBA-01 remaniés au cours d'un cycle de séchage/imbibition (support rugueux)</i>	104
4.10.2	<i>Comparaison de AVR et MBA remaniés pour les mêmes dimensions d'échantillons sur support lisse</i>	106
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		111

1. INTRODUCTION

Armines-Centre de Géosciences a contribué aux Tâches 1, 2, 3 et 8 du projet. Il a préparé la Présentation d'ensemble ci-dessus.

Les éléments suivants présentent les éléments relatifs à la tâche 1 (la synthèse bibliographique étant reportée en Annexe 1) et la tâche 2, puis les résultats des travaux relatifs aux tâches 3 et 4 rassemblées.

2. L'ALEA SECHERESSE EN ILE-DE-FRANCE

Cette synthèse prend appui sur les travaux réalisés par Armines-Centre de Géosciences sur le contexte climatique de l'Ile-de-France et sur une synthèse tirée des travaux de cartographie départementale réalisés par le BRGM (et disponibles sur le site www.argiles.fr), avec le soutien du MEEDDAT.

2.1 L'ALEA SECHERESSE ET LES EVENEMENTS CLIMATIQUES EXTREMES DANS LE CADRE DU CHANGEMENT GLOBAL. LE CAS DE L'ILE DE FRANCE

2.1.1 Les événements climatiques extrêmes de type sécheresse dans le cadre du changement climatique global

D'après le GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Etude du Climat), 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 (Bard E., 2006 ; IPCC-GIEC, 2007).

En France métropolitaine, l'augmentation des températures moyennes varie de 0,2 à 0,8 °C mais le climat observé sur le territoire français s'est réchauffé davantage par ses températures minimales que maximales, (Dequé, 2003). Le changement climatique a donc un impact sur les températures minimales relevées quotidiennement, mais a-t-il une influence sur les périodes de sécheresse ?

Pour étudier ce phénomène, différentes méthodes sont utilisées : une approche historique, l'analyse statistique, des simulations numériques et l'étude des situations météorologiques. Les conclusions de ces différentes méthodes d'études sont rapportées ci-après.

2.1.2 Analyse des données historiques

Pour l'étude d'occurrences des événements extrêmes secs, les documents historiques nous permettent de compléter les relevés instrumentaux qui ont débuté pour beaucoup après 1850. Ces données ont été relevées dans Garnier (1967) elles figurent dans l'annexe 7.3.1 de ce rapport.

Les sécheresses déclarées dans les chroniques sont donc nombreuses depuis l'an 1135, leur impact sur l'agriculture est essentiellement mis en exergue mais elles avaient aussi de nombreux autres effets. Toutefois il est difficile d'apprécier l'intensité de ces événements

climatiques et surtout de les comparer avec les événements plus récents, quantifiés par les services météorologiques français.

Depuis le début du 20^{ème} siècle, et surtout depuis 1872 à Paris-Montsouris des mesures des précipitations et températures ont permis de mettre en évidence des sécheresses importantes en 1921, 1947-1955, 1976, 1989-1991, 1996-1997 etc.

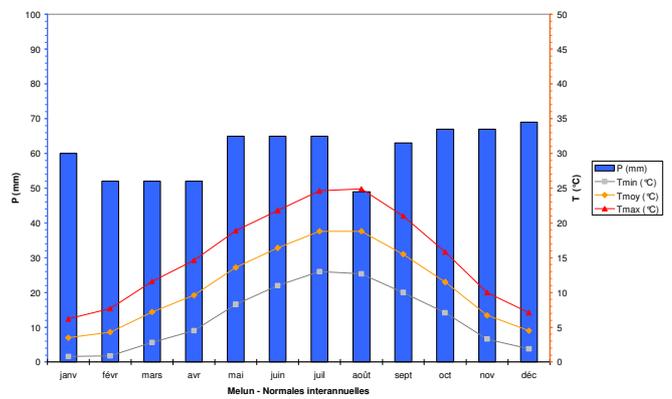
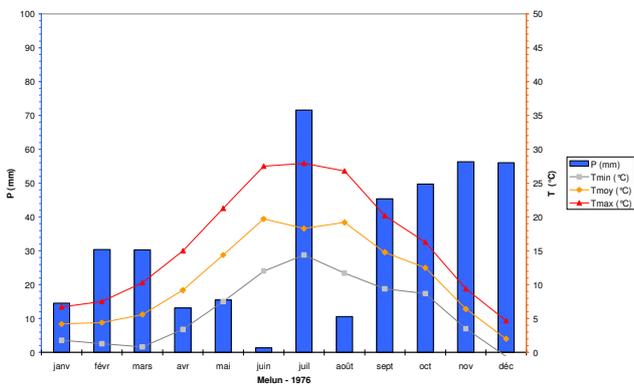
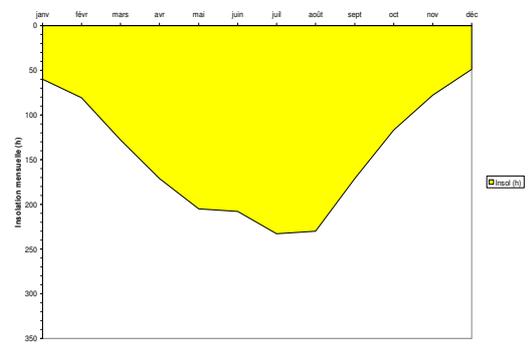
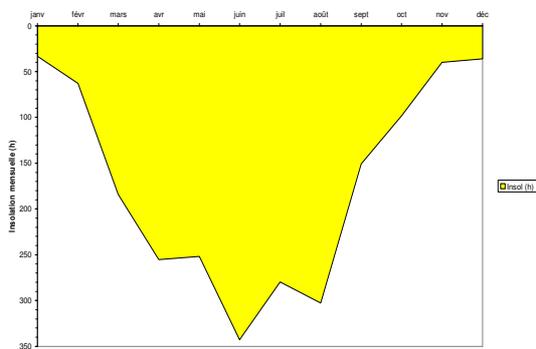
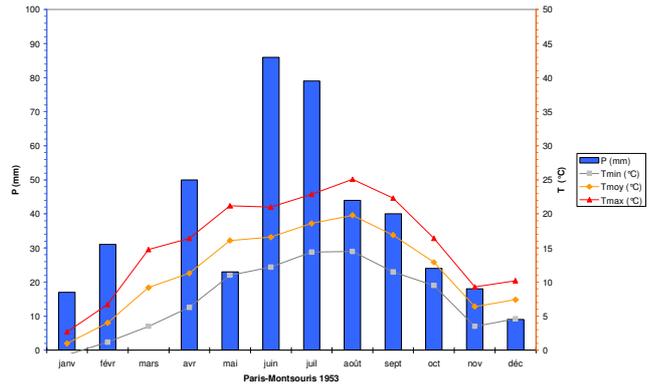
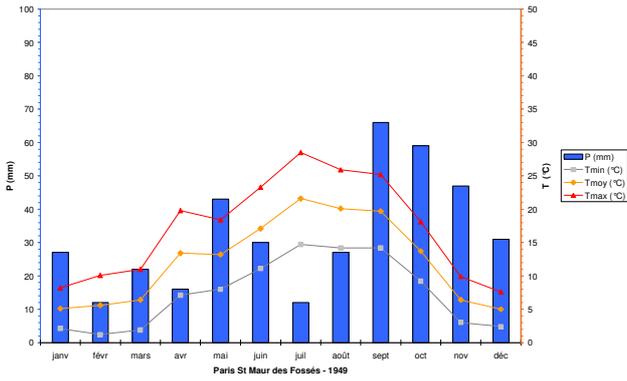
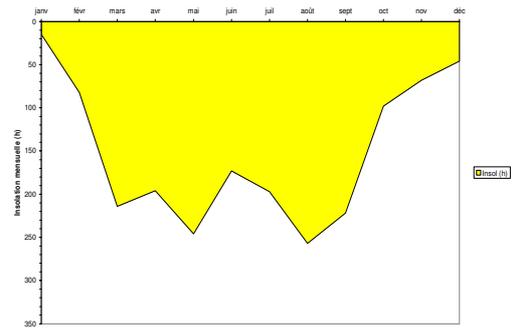
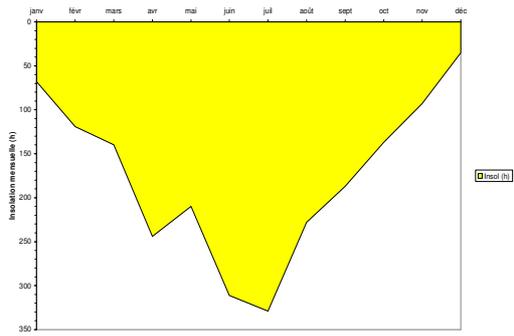
Ces périodes sont présentées de manière détaillée par l'intermédiaire de diagrammes ombrothermiques, présentés ci-après. Ces diagrammes sont conçus de telle façon que l'échelle des précipitations est double de celle des températures. Cela met alors en évidence les mois dits « secs » quand la courbe des températures moyennes est au dessus de la barre des précipitations cumulées sur 1 mois. Nous avons également choisi de représenter sur ces graphiques la durée d'insolation mensuelle : durée de l'éclairement solaire supérieur ou égal à 120 Watts/m². Les stations météorologiques privilégiées sont celles en activité dans la région parisienne sud-est à cette période. Trois sécheresses importantes sont détaillées : 1949 à la station de Paris St-Maur des Fossés, 1953 à Paris-Monsouris et 1976 à Melun. Ces diagrammes sont comparés à celui du climat moyen à Melun dont les normales interannuelles sont calculées sur 30 ans pour les précipitations et sur 50 ans pour les températures.

Le climat moyen à Melun est remarquable par le caractère excessivement régulier des précipitations mensuelles proche des 60 mm quelque soit la saison. Le total des précipitations annuelles étant de 726 mm. L'effet des saisons est essentiellement visible sur les températures et l'insolation.

Les sécheresses de 1949 (avec un total de précipitation de 392 mm) et 1976 (394.8 mm) ont quelques points communs, elles concernent surtout les printemps et étés, ces étés sont aussi particulièrement ensoleillés. La sécheresse de 1953 (421 mm) apparaît nettement différente car marquée par une année globalement sèche y compris en hiver sans pour autant être très ensoleillée.

On peut également essayer de caractériser dans une première approche l'intensité de la sécheresse par le rapport entre la pluviométrie moyenne et la pluviométrie de la période concernée (pourcentage à la normale).

Ainsi pour 1949 et 1976 il est tombé seulement 54 % des précipitations moyennes interannuelle et en 1953 seulement 58 %. Ces valeurs ont été étudiées statistiquement par Brochet immédiatement après la sécheresse de 1976 avec une base de données qui comportait plus de 100 ans de mesure et d'après ses calculs qui portaient uniquement sur le printemps et l'été. Il déduisait que la sécheresse de 1976 avait une période de retour statistique de plus de 100 ans. Ces études statistiques sont développées dans le prochain paragraphe.



2.1.3 Analyse statistique

Cette étude est basée sur les données météorologiques de la station de Melun. Cette station a été sélectionnée sur des critères de représentativité du climat régional et plus particulièrement de la Seine et Marne et du Val de Marne. (La station située sur un aéroport est moins sensible au biais induit par l'urbanisation importante de ces départements et tout particulièrement du Val de Marne.) Egalement la longueur de ses relevés (60 ans de précipitation de 1947 à 2006) permet un travail précis et des résultats plus fiables. C'est également une station bien instrumentée : relevé de l'insolation depuis 1953, du vent depuis 1961 et de l'ensemble des paramètres nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman depuis 1979. Ces éléments seront détaillés dans les calculs suivants.

Afin de réaliser l'analyse statistique des périodes de sécheresse il faut caractériser ces sécheresses par un paramètre d'intensité. Ce paramètre ou indice peut porter exclusivement sur les précipitations comme le pourcentage à la normale ci-dessous présenté ou être un résultat plus complexe tenant compte des différentes mesures météorologiques : P, T, Insolation ...

Ces indices sont de 3 types : Indices d'anomalie de précipitation, Indices « alimentation - demande » basés sur le bilan hydrique et Indices récursifs qui estiment la sécheresse d'une période à partir de l'indice de sécheresse de la période précédente.

Indices d'anomalie de précipitations

Les indices d'anomalie de précipitations sont basés sur le principe que les sécheresses sont liées aux précipitations tombées durant la période précédente (entre un mois et un an).

L'Ecart à la normale ou AI est calculé par différence entre les précipitations mensuelles et la moyenne de ces valeurs sur 60 ans compris entre 1947 et 2006.

mois	Pluie mm	T. Moy °C	Insolation minutes	Insolation heures	Force moy. vent	ETP mm Penman
janvier	55.01	3.23	3319.44	55.32	4.63	17.44
février	46.93	4.13	4792.93	79.88	4.57	24.16
mars	50.06	7.15	7866.00	131.10	4.50	47.27
avril	47.13	9.76	10199.48	169.99	4.26	71.04
mai	57.14	13.61	12282.96	204.72	3.87	95.01
juin	52.97	16.64	12917.35	215.29	3.63	110.03
juillet	54.26	18.72	13736.81	228.95	3.33	128.69
août	52.18	18.49	12978.96	216.32	3.39	119.13
septembre	57.32	15.74	10185.00	169.75	3.57	74.16
octobre	56.81	11.71	7108.87	118.48	3.80	42.79
novembre	57.83	6.70	4040.57	67.34	4.30	20.34
décembre	56.72	4.21	2752.46	45.87	4.59	15.81

Valeur des moyennes mensuelles à Melun (période de calcul) P mensuelle (1947-2006), T moyenne mensuelle et Insolation mensuelle (1953-2006), Vent mensuel (1961-2006), ETP Penman cumulée sur un mois (1979-2006).

- Ecart à la normale ou Anomaly Index (AI)

$$AI = P - \mu(P)$$

avec P le total des précipitations mensuelles

$\mu(P)$ moyenne interannuelle pour ce mois dans une longue série.

Nous avons donc calculé les moyennes mensuelles interannuelles pour les paramètres utiles à nos calculs.

Or les anomalies de précipitations pour des régions inhomogènes ou de grandes zones dont les conditions climatiques sont variées, ne sont pas comparables. Ce problème peut être évité en utilisant des valeurs relatives ou des valeurs standardisées.

Les valeurs relatives sont les 2 valeurs suivantes :

- quantité de précipitations relative ou pourcentage à la normale (rP)

$$rP = \frac{P}{\mu(P)} \text{ (x100 pour un résultat en \%)}$$

avec P le total des précipitations mensuelles

$\mu(P)$ la moyenne interannuelle pour ce mois dans une longue série.

On note que lorsque rP est inférieur à 100 les précipitations sont inférieures aux normales saisonnières.

- indice d'anomalie relative (rAI)

$$rAI = \frac{[P - \mu(P)]}{\mu(P)} \text{ (x100 pour un résultat en \%)}$$

Si rAI est négatif, les précipitations sont inférieures à la moyenne du mois considéré.

On peut utiliser l'indice suivant comme valeur standardisée :

- indice d'anomalie standard (SAI)

$$SAI = \frac{P - \mu(P)}{\sigma(P)}$$

avec $\sigma(P)$ l'écart-type de la série des précipitations mensuelles du mois fixé.

Lorsque SAI est inférieur à 0 le mois est sec.

Nous avons donc calculé l'écart type mensuel des paramètres pour la station de Melun. (Les écarts types sont toujours dans la même unité que les valeurs considérées).

mois	Pluie mm	T. Moy °C	Insolation minutes	Insolation heures	Force moy. vent	ETP mm Penman
janvier	27.63	2.21	940.82	15.68	0.90	4.37
février	27.22	2.67	1626.73	27.11	1.00	5.50
mars	30.53	1.68	2255.44	37.59	0.72	7.14
avril	30.03	1.11	2326.54	38.78	0.65	12.88
mai	31.13	1.31	2522.23	42.04	0.50	13.48
juin	26.94	1.31	2689.58	44.83	0.53	15.00
juillet	29.58	1.55	2808.13	46.80	0.47	20.40
août	27.11	1.47	2303.03	38.38	0.49	18.18
septembre	33.20	1.39	2297.53	38.29	0.65	11.52
octobre	34.05	1.51	2121.63	35.36	0.72	8.32
novembre	25.04	1.50	1305.34	21.76	0.79	3.11
décembre	27.78	1.72	1090.22	18.17	0.91	3.00

Valeur des écart-types mensuels à Melun (période de calcul) P mensuelle (1947-2006), T moyenne mensuelle et Insolation mensuelle (1953-2006), Vent mensuel (1961-2006), ETP Penman cumulée sur un mois (1979-2006).

Indices «alimentation / demande» basés sur l'équilibre hydrique

Ces indices permettent de considérer d'une part l'alimentation caractérisée par les précipitations et d'autre part la demande des plantes et du sol que l'on exprime habituellement soit par l'évapotranspiration potentielle soit par sa plus simple approximation, la température moyenne de la période considérée. Toutes ces formules sont utilisables avec les données mensuelles dont nous disposons pour la station de Melun, les résultats des calculs sont présentés dans l'annexe3.

- Indice de précipitation de Lang (LI)

$$LI = P/T \text{ en mm/}^{\circ}C$$

- Indice d'aridité de de Martonne (dMI)

$$dMI = 12 P/(T+10) \text{ en mm/}^{\circ}C$$

- Coefficient hydrothermique de Selyanov (SHC) adapté pour des valeurs mensuelles par Bagrov valable seulement pour T>10°C

$$SHC = P / (3 \times T) \text{ en mm/}^{\circ}C$$

- Indice de Thorthwaite

$$TI = 1.65 [P/(T+12.2)]^{(10/9)}$$

- 1^{er} Indice de sécheresse de Ped (PDII)

$$PDII = \frac{\Delta T}{\sigma(T)} - \frac{\Delta P}{\sigma(P)} \text{ sans unité.}$$

avec $\Delta P = P - \mu(P) (mm)$

$\Delta T = T - \mu(T) ( C)$

Plus le *PDII* est grand plus la période est sèche.

Quelques indices contiennent le paramètre évapotranspiration potentielle explicitement. Elle peut être calculée à partir de différentes formules avec de plus en plus de précision car de plus en plus de paramètres climatiques entrent dans les calculs : formules de Thornthwaite, de Turc, et de Penman. Météo France nous a fourni les résultats du calcul selon la formule de Penman sur la période 1979-2006 pour Melun car ils disposent alors de la mesure quotidienne de tous les paramètres nécessaires au calcul. Nous avons calculé l'ETP mensuelle selon les formules de Thornthwaite et de Turc pour la période 1953-2006 afin d'allonger la période d'étude des sécheresses. Sur la période 1979-2006 nous disposons donc des 3 résultats d'ETP. Ces séries de valeurs évidemment corrélées nous ont permis de calculer une valeur approchée de l'ETP Penman sur la période (1953-1979). Ces calculs font l'objet de l'annexe n 2.

- Déficit en eau potentiel

$$ETP - P$$

Cet indice peut être cumulé sur l'année et donne alors une bonne vision de la sécheresse des sols.

- Ratio de l'évapotranspiration potentielle

$$ETP/P$$

Cet indice, en comparant l'évapotranspiration aux précipitations, permet de déterminer si un mois est humide (cas où l'indice est inférieur à 1) ou sec.

- Indice d'humidité disponible (MAI)

$$MAI = P/ETP$$

On notera pour chacun de ces indices la simplicité des calculs. De plus, les paramètres qui interviennent dans ces indices sont tous disponibles à partir de séries de données de précipitations, températures et insolation disponibles dès 1953. Le vent n'est utilisé qu'à partir de 1979 dans le calcul de l'ETP selon Penman.

Les indices "alimentation / demande" révèlent mieux les déficits hydriques qui résultent à la fois de précipitations faibles et de températures élevées. Le *PDII* cumule l'anomalie standard de précipitation et l'anomalie standard de température alors que le rapport *ETP/P* les conjugue. Les valeurs du *PDII* supérieures à 1 traduisent des mois secs comme les valeurs d'*ETP/P* supérieures à 2. Le *PDII* traduit une anomalie inhabituelle pour la station alors que le rapport *ETP/P* révèle un déficit hydrique absolu. On peut également regretter que ces indices ne tiennent pas compte du bilan hydrique des mois précédents.

Indices récurrents

Les indices récurrents tendent à estimer la sécheresse du mois courant à partir de l'estimation de la sécheresse du mois précédent.

- Indice de sécheresse et d'inondation de Bhalme Mooley (BMDI)

$$i_0 = 0$$

$$i_k = c_1 \times i_{k-1} + (SAI)_k / c_2$$

$$BMDI = \frac{\sum_{i=1}^k i_k}{k}$$

Les valeurs de c_1 et c_2 voisines de 0.5 peuvent varier en fonction des zones géographiques considérées. Dans nos calculs, $c_1 = 0.5$ et $c_2 = 0.4855$. La période de k mois considérée peut correspondre à une saison ou à une année. Cet indice, relativement simple à calculer, correspond à une simplification de l'indice de Palmer PDSI et évolue sur la même échelle de valeur. Comme il ne prend en compte que les précipitations, nous pouvons le calculer depuis 1947.

- Indice de sécheresse de Palmer (PDSI)

W.C. Palmer en 1965 a proposé l'indice de sévérité de la sécheresse : Palmer Drought Severity Index (PDSI). Cet indice compare le bilan hydrique du mois courant au bilan hydrique de ce mois moyenné sur 30 ans. Si ce bilan est déficitaire l'indice du mois précédent est diminué du déficit ainsi calculé et cette différence représente l'indice du mois courant. Nous ne donnerons que quelques indications sur la méthode qui est très détaillée dans la revue citée en référence.

Cet indice prend des valeurs sur une échelle allant de +7 à -7 et permet de classer une période climatique par rapport à une autre.

PDSI ou BMDI	caractère de la période
$4,00 \leq PDSI$	extrêmement humide
$3 \leq PDSI < 4$	humidité sévère
$1,5 \leq PDSI < 3$	humidité moyenne à modérée
$-1,5 < PDSI < 1,5$	humidité normale
$-3 < PDSI \leq -1,5$	sécheresse moyenne à modérée
$-4 < PDSI \leq -3$	sécheresse sévère
$PDSI \leq -4$	sécheresse extrême

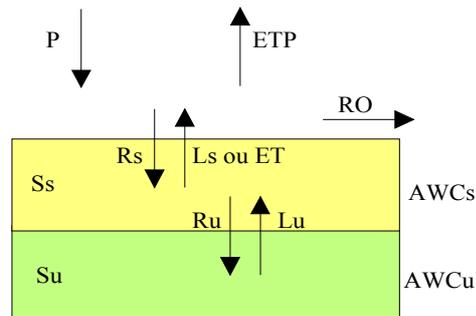
Le calcul de cet indice mensuel est assez complexe. Ce calcul fait appel aux résultats des équations de bilan d'eau sur un ensemble de deux couches de sol.

Rappel du bilan d'eau, toutes les quantités sont des hauteurs de tranche d'eau exprimées en pouces (1 pouce = 25,4 mm) :

P : hauteur des précipitations ;

ETP : évapotranspiration potentielle ;

RO : ruissellement et perte par infiltration de la couche inférieure ;
 S_s : réserve d'eau utilisable dans la couche supérieure ;
 S_u : réserve d'eau utilisable dans la couche inférieure ;
 R_s : recharge d'eau de la couche supérieure ;
 R_u : recharge d'eau de la couche inférieure ;
 L_s ou ET : perte en eau de la couche supérieure ;
 L_u : perte en eau de la couche inférieure ;
 AWC_s : capacité au champ de la couche supérieure (réserve maximale) ;
 AWC_u : capacité au champ de la couche inférieure (réserve maximale).



Bilan d'eau sur 2 couches superposées

Le calcul du $PDSI$ revient à comparer le bilan d'eau d'un mois avec le bilan d'eau moyen, pour ce même mois, établi à partir de données sur 30 ans ou plus.

Les données sont les précipitations mensuelles (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP calculée à partir de la formule de Thornthwaite ou de Turc), la réserve maximale du sol (AWC_s et AWC_u) et le stock contenu dans le sol dans les conditions initiales (S_s et S_u). A partir d'un bilan d'eau basé sur plusieurs hypothèses simplificatrices, on calcule ET , $R_s + R_u$, RO , et L_u pour tous les mois sur 30 ans ou plus. On calcule également PR , PRO , PL respectivement recharge potentielle, ruissellement potentiel et perte d'eau potentielle grâce aux équations suivantes.

La recharge potentielle est la quantité d'eau nécessaire pour remplir le stock d'eau.

$$PR = (AWC_u + AWC_s) - (S_s + S_u)$$

Le ruissellement potentiel est d'après Wisheimer, et sous certaines conditions, égal à la réserve maximale moins la recharge potentielle.

$$PRO = S_s + S_u$$

La perte d'eau potentielle correspond à la quantité d'eau que pourrait perdre le sol par évaporation à condition que les précipitations soient nulles.

$$PL = PL_s + PL_u \text{ avec } PL_s = \min(ETP, S_s) \text{ et } PL_u = (ETP - PL_s) S_u / (AWC_u + AWC_s)$$

et $PL_u < S_u$

Ensuite, on calcule les valeurs surlignées \overline{P} , \overline{ET} , \overline{R} , \overline{RO} , \overline{L} qui sont des moyennes mensuelles interannuelles (sur 30 ans) de P , ET , R , RO , L . On calcule également les moyennes interannuelles sur 30 ans : \overline{ETP} , \overline{PR} , \overline{PRO} , \overline{PL} .

On calcule ensuite les valeurs avec accent circonflexe \hat{X} qui sont des valeurs calculées à partir des conditions climatiques existantes et des moyennes interannuelles.

$$\hat{ET} = \frac{\overline{ET}}{\overline{ETP}} \cdot PET = \alpha \cdot ETP \quad \text{et} \quad \hat{R} = \frac{\overline{R}}{\overline{PR}} \cdot PR = \beta \cdot PR$$

$$\hat{RO} = \frac{\overline{RO}}{\overline{PRO}} \cdot PRO = \gamma \cdot PRO \quad \text{et} \quad \hat{L} = \frac{\overline{L}}{\overline{PL}} \cdot PL = \delta \cdot PL$$

Le bilan d'eau s'écrit :

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L}$$

On calcule donc \hat{P} et d .

$$d = P - \hat{P}$$

$$\text{On calcule alors : } K'i = 1,5 \cdot \log \left[\left(\frac{\overline{ETP} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2,80 \right) \div \overline{Di} \right] + 0,5$$

\overline{Di} est la moyenne interannuelle des valeurs absolues de d pour le mois i .

$$\text{et } Ki = \frac{17,67}{\sum_{i=1}^{12} \overline{Di} \cdot K'i} \cdot K'i$$

$$Zi = d \cdot Ki$$

Le $PDSI$ d'un mois i dépend de celui du mois précédent :

$$PDSI_i = (0.897 \cdot PDSI_{i-1}) + \frac{Z_i}{3}$$

Comparaison et analyse de la pertinence des indices

Nous avons calculé les valeurs mensuelles de ces différents indices pour la période 1947-2006 pour la station de Melun à l'exception du $PDSI$. Le $BMDI$ a été calculé sur des périodes glissantes de 12 mois et de 6 mois et nous avons sélectionné le $BMDI$ sur 6 mois car la valeur calculée sur 12 mois décale de quelques mois l'indication de sécheresse après sa période historique. Afin de comparer leur pertinence, nous utiliserons les classes établies par Farago pour des sécheresses fréquentes et extrêmes en saisons printanières et estivales.

	rP	rAI	SAI	PDI1	ETP/P
sécheresse	<0.7	<-0.3	<-0.6	>1.5	>2.5
sécheresse extrême	<0.5	<-0.5	<-1	>2	>3.5

Afin de visualiser les valeurs de ces indices, nous avons sélectionné les mois pour lesquels le $BMDI$ était inférieurs à -2 (mois secs, le $BMDI$ est inférieur à -3 pour des mois très secs).

Le tableau de présentation des résultats fait l'objet de l'annexe n°3.

Cette sélection de valeur ($BMDI < -2$) caractérise assez bien les sécheresses passées 1947-1955, 1976, 1989-1991, 1996-1997. Elle exprime également l'importance de ces sécheresses avec les plus faibles indices pour 1949, 1959, 1976. La correspondance entre le BMDI et les autres indices est correcte mais décalée puisque le BMDI additionne les écarts standardisés à la normale des précipitations sur 6 mois et que les autres indices donnent un résultat mensuel.

Toutefois l'effet du changement climatique n'est pas pertinent sur la fréquence des sécheresses actuelles car « la mise en évidence de tendances d'événements extrêmes se heurte à des limites tenant à la rareté de ces derniers. L'accumulation apparente d'événements extrêmes au cours des dernières années pourrait tout aussi bien représenter une tendance réelle qu'être due au hasard (Frei, 2003). On remarque en effet concernant les sécheresses que de 1949 à 1959 il y a eu 4 étés particulièrement secs, donc la succession de 1990, 1992, 1996 n'est peut-être pas significative d'une aridification du climat en Seine et Marne.

2.1.4 Utilisation des modèles numériques pour des simulations climatiques

Le changement climatique peut par contre aisément être intégré aux différents modèles numériques de prévision météorologique et climatique. Les résultats de quelques calculs sont rapportés par U. Neu (2003) : « Pour le 21^{ème} siècle, les modèles climatiques prévoient un accroissement de température compris entre 1.4 et 5.8 °C. Ce réchauffement sera nettement plus rapide que le précédent »... ». En général, on s'attend à une évolution vers des maxima de température plus élevés et davantage de jours de canicule »... ». La concentration moyenne de la vapeur d'eau dans l'atmosphère évoluera aussi globalement à la hausse au 21^{ème} siècle, ..., les précipitations devraient varier davantage d'une année à l'autre. En été, les sécheresses augmenteront probablement dans la plupart des régions situées aux latitudes moyennes à l'intérieur des continents. »

2.1.5 Utilisation des situations météorologiques

Un moyen de caractériser les événements extrêmes secs est de considérer quelles situations météorologiques s'y rapportent et comment ces événements se manifestent à l'échelle régionale. Sur la façade atlantique française et européenne, le climat est déterminé dans une large mesure par le courant d'ouest au dessus de l'Atlantique et par la position de l'anticyclone des Açores. Ces phénomènes s'observent à une échelle semi-continentale. Les pressions atmosphériques sont donc aussi des paramètres indicatifs de la sécheresse.

Références bibliographiques

Dequé M. (2003). *Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux événements météorologiques extrêmes - Statistiques et modélisations des phénomènes extrêmes*. Rapport de l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique en France et dans les DOM-TOM (ONERC) pp 15-18.

Farago T. Kozma E., Nemes CS. (1989) *Drought indices in meteorology*. Journal of the Hungarian Meteorological Service vol 93 n°1 Jan-Feb pp 45-60.

Frei C. (2003). *Événements extrêmes et changements climatiques – La détection de tendances se heurte à des limites*. Rapport de l'Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC) pp 29-31.

Garnier M. (1967). *Données historiques des grands étés en France - Climatologie de la France, Sélection de données statistiques*. Météo France

Guinle-Thénevin I. (1998). *Influence des valeurs extrêmes des données physiques de l'environnement naturel sur le sol et le proche sous-sol*. Thèse Géologie de l'Ingénieur ENSMP, 176 p.

IPCC-GIEC – Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, 2007, 18p.

Neu U. (2003). *Événements extrêmes et changements climatiques – Observation des changements climatiques et estimation des changements futurs*. Rapport de l'Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC) pp 20-22.

Palmer W.C. (1965). *Meteorological drought*. Research paper n°45, U.S. Weather Bureau. NOAA Library and Information Services Division, Washington, D.C. 20852. 58p.

Toulemont M., Cojean R. (2007). *La prévention des risques liés à la sécheresse géotechnique : une expérience transposable à d'autres aléas naturels*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, pp.215-220

2.2 SYNTHÈSE TIRÉE DES TRAVAUX DE CARTOGRAPHIE DÉPARTEMENTALE DE L'ALÉA RETRAIT-GONFLEMENT SUR LES DÉPARTEMENTS DE L'ÎLE-DE-FRANCE.

Un ensemble de rapports, disponibles sur le site www.argiles.fr du BRGM, a été utilisé pour établir cet état des connaissances relatif au retrait-gonflement des sols argileux en Ile-de-France. Ces rapports sont présentés ci-après en références bibliographiques.

2.2.1 Le retrait-gonflement dans les sols argileux de l'Ile-de-France

C'est la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles qui a permis la prise en compte par les compagnies d'assurances des sinistres liés à la sécheresse. Il apparaît que les 7 départements d'Ile-de-France font partie des 20 départements présentant le plus fort coût total d'indemnisation à l'échelle nationale.

Les études de cartographie départementale de l'aléa sécheresse, réalisées par le BRGM (Programme 1998-2010), ont pour objectifs 1) de mettre en évidence la relation existant entre la nature géologique des terrains et la répartition statistique des sinistres, 2) d'élaborer un document de prévention par référence à l'acte de construire, utile aux communes et à l'Etat (en particulier pour l'établissement des PPRN : Plans de Prévention des Risques Naturels), aux assureurs (pour une meilleure appréciation de l'aléa à mettre en rapport avec des sinistres constatés), aux maîtres d'ouvrages (pour qu'ils mettent en œuvre les techniques constructives permettant d'éviter les dommages aux structures en cas de retrait gonflement des sols de fondation), 3) de mettre à disposition des experts un outil qui constitue une aide au diagnostic en cas de sinistres futurs.

Les différents rapports établis par le BRGM prennent appui sur une documentation existante issue des travaux de cartographie géologique, de travaux universitaires (thèses), de rapports d'études géotechniques, de comptes rendus de sinistres. La cartographie est réalisée à l'échelle du 1/50 000, correspondant à l'échelle de la carte géologique préexistante. Il faut souligner que de ce fait, cette cartographie ne saurait prendre en compte, dans le détail, la variabilité attachée aux formations géologiques elles-mêmes (lithofaciès, épaisseurs), qu'il s'agisse des formations du substrat ou des formations superficielles, ainsi qu'aux contextes géomorphologiques, hydrologiques et hydrogéologiques locaux. Une telle cartographie permet une première approche, à l'échelle départementale, de la problématique du retrait-gonflement des sols argileux. Néanmoins, il faut considérer que, du fait de l'échelle de la cartographie, en rapport avec les moyens alloués à une telle mission, il reste nécessaire de mettre en œuvre une étude géotechnique au niveau de la parcelle avant toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par des formations géologiques définies comme représentant un aléa moyen à fort.

La méthodologie mise en œuvre (Vincent et al., 2007, Vincent et al., 2008) consiste à croiser plusieurs couches d'information géoréférencées. La carte géologique à l'échelle du 1/50 000 permet de délimiter les formations affleurantes (formations du substrat géologique ou formations superficielles quaternaires), tout en prenant appui sur la BSS : Banque des données du Sous-Sol). Ces formations font ensuite l'objet d'une hiérarchisation sur la base de 3 critères : nature lithologique (le caractère plus ou moins argileux au sens granulométrique

étant spécialement pris en compte), composition minéralogique (la présence de minéraux argileux gonflants - smectites, interstratifiés - étant spécialement considérée), comportement géotechnique (par référence à des essais de type : indice de plasticité, valeur de bleu, retrait linéaire). La combinaison de ces éléments permet d'établir *une carte de susceptibilité* au retrait-gonflement (3 catégories sont définies et notées, avec note 1 : susceptibilité faible, note 2 : susceptibilité moyenne, note 3 : susceptibilité forte). Ensuite, l'analyse des sinistres identifiés comme en rapport avec la problématique du retrait-gonflement est réalisée avec, pour chaque formation argileuse, la définition d'une densité de sinistres ramenée à 100 km² de surface réellement urbanisée et l'établissement d'*une carte de sinistralité* (3 catégories sont définies et notées, avec note 1 : sinistralité faible, note 2 : sinistralité moyenne, note 3 : sinistralité forte). L'analyse de ces 2 cartes (en affectant un poids double à la note de susceptibilité par rapport à la note de sinistralité) conduit enfin à l'établissement d'*une carte d'aléa* (voir planches ci-après).

Le retour d'expérience attaché à cette démarche méthodologique permet de dire (Vincent et al., 2008) que : 1) les secteurs classés en aléa fort correspondent à des zones où affleurent des formations argileuses riches en smectites, avec une forte sinistralité pour les zones actuellement urbanisées, 2) les secteurs classés en aléa moyen correspondent à des zones où les formations géologiques à l'affleurement sont argileuses mais plus hétérogènes, avec une sinistralité moins régulière, 3) les secteurs classés en aléa faible correspondent à des zones où les formations géologiques à l'affleurement sont très hétérogènes, seulement localement argileuses, avec une sinistralité très irrégulièrement répartie.

2.2.2 Synthèses par département de l'Ile-de-France

1) Hauts-de-Seine (92)

Dans le département des Hauts-de-Seine (Donsimoni M. et al., 2006), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 25 formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles 19 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement suivant les critères présentés.

La mise en œuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées 3 classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d'affleurement de 175 km², on constate que :

- 9,7% (17 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 16,7% (29 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 28,2% (50 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- 45,3% (79 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d'aléa fort correspondent à 4 formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles vertes de Romainville (g1, AVR), sur 6,63 km² ;

- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 5,78 km² ;
- Marnes à Huîtres (g1, MH), sur 2,81 km² ;
- Fausses glaises, Sables d'Auteuil, Argiles plastiques, Conglomérat de Meudon (e4, SS-FG-AP), sur 1,81 km².

Ces 4 formations classées en aléa fort représentent à l'affleurement une surface urbanisée de 9,5 km², soit 11,5% de la surface urbanisée totale du département, avec 37,5% des sinistres répertoriés (219 sur un total de 584).

Les zones d'aléa moyen correspondent à 5 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles à meulière de Montmorency (p-IV, AMM) ;
- Marnes à Pholadomies et 4^{ème} masse du Gypse (e6-7, MGC) ;
- Masses et marnes du Gypse (e7, G) ;
- Colluvions argileuses (CE-A) ;
- Alluvions récentes de la Bièvre (Fz, B).

2) Seine-Saint-Denis (93)

Dans le département de Seine-Saint-Denis (Plat E. et al., 2007), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 20 formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles 17 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement.

La mise en œuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées 3 classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d'affleurement de 237 km², on constate que :

- 6,2% (14,7 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 35,5% (84,1 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 56,7% (134,4 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- moins de 2% (environ 4 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d'aléa fort correspondent à 3 formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes (g1, AR), sur 9,40 km² ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 4,83 km² ;
- Marnes à Huîtres (g1, MH), sur 0,31 km².

Ces 3 formations classées en aléa fort représentent 6,2% de la surface urbanisée du département (cette surface étant estimée à 30 km², soit 12,5% de la superficie totale du département), avec 20,8% des sinistres répertoriés (509 sur un total de 2451).

Les zones d'aléa moyen correspondent à 6 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Colluvions polygéniques (CE) ;
- Marnes à Pholadomies et Formation du Gypse, 4^{ème} masse du Gypse (e6-7, MGC) ;

- Masses et marnes du Gypse (e7, G) ;
- Argiles à meulières de Brie (Rfv/g1, CB) ;
- Marnes à Pholadomies (e7, MP) ;
- Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies (e7, CCh-MP)

3) Val-de-Marne (94)

Dans le département de Val-de-Marne (Plat E. et al., 2007), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 20 formations géologiques à l’affleurement, parmi lesquelles 23 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement.

La mise en œuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d’aléa où sont distinguées 3 classes d’aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d’affleurements de 244 km², on constate que :

- 10,7% (26,1 km²) sont classés en zone d’aléa fort ;
- 17,8% (43,4 km²) sont classés en zone d’aléa moyen ;
- 70,1% (171,0 km²) sont classés en zone d’aléa faible ;
- moins de 1,5% (environ 4 km²) sont classés en zone d’aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d’aléa fort correspondent à 5 formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d’affleurement décroissantes :

- Argiles vertes de Romainville, Glaises à Cyrènes (g1, AR), sur 12,03 km² ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d’Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 11,12 km² ;
- Marnes ludiennes (faciès de transition, e7, ML), sur 2,19 km² ;
- Marnes à Huîtres et Argiles à Corbules (g1, MH), sur 0,58 km² ;
- Argile plastique, sables et grès (e4, AP), sur 0,21 km².

Ces 5 formations classées en aléa fort représentent 11,6% de la surface urbanisée du département (cette surface étant estimée à 28 km², soit 11,4% de la superficie totale du département), avec 44% des sinistres répertoriés (1180 sur un total de 2682).

Les zones d’aléa moyen correspondent à 7 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d’affleurement décroissantes :

- Argiles à meulières de Brie (Ffv/g1, CB) ;
- Colluvions polygéniques (CE) ;
- Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies (e7, CCh-MP) ;
- Alluvions récentes de la Bièvre (Fz, B) ;
- Marnes à Pholadomies et Formation du Gypse, 4^{ème} masse du Gypse (e6-7, MGC) ;
- Masses et marnes du Gypse (e7, G) ;
- Marnes infragypseuses, Masses et marnes du gypse et Calcaire de Champigny (e6-7, CH-SO).

4) Essonne (91)

Dans le département de l'Essonne (Plat E. et al., 2007), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 25 formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles 21 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement.

La mise en œuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées 3 classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d'affleurements de 1812 km², on constate que :

- 4,7% (85,3 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 27,5% (498,8 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 39,8% (722,0 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- 27,9% (506,1 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d'aléa fort correspondent à 5 formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles vertes de Romainville, Glaises à Cyrènes (g1, AR), sur 33,91 km² ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 24,42 km² ;
- Argile plastique et argiles sableuses de l'Yprésien (e4, APS), sur 13,37 km² ;
- Marnes à Huîtres (g1, MH), sur 9,92 km² ;
- Marnes ludiennes (faciès de transition, e7, ML), sur 4,58 km².

Ces 5 formations classées en aléa fort représentent 6,5% de la surface urbanisée du département (cette surface étant estimée à 39,6 km², soit 2,2% de la superficie totale du département), avec 39,6% des sinistres répertoriés (1339 sur un total de 3379).

Les zones d'aléa moyen correspondent à 8 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles à meulière de Brie (Ffv/g1, CB) ;
- Argiles à meulière de Montmorency (p-IV, MM) ;
- Molasse du Gâtinais (m1, MG) ;
- Sables et grès de Breuillet (e4, SG) ;
- Marnes associées aux masses du gypse et Calcaire de Champigny (e7, G) ;
- Argiles à silex et craie blanche à silex, RC) ;
- Colluvions polygéniques (CE) ;
- Dépôts tourbeux (T).

5) Yvelines (78)

Dans le département de l'Essonne (Donsimoni M. et al., 2005), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 37 formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles 22 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement.

La mise en œuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées 3 classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d'affleurements de 2278 km², on constate que :

- 8,54% (194 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 20,10% (458 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 39,55% (878 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- 32,81% (747 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d'aléa fort correspondent à 6 formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Marnes ludiennes (e7, ML), sur 95,55 km² ;
- Calcaire de Sannois et Argile verte de Romainville indifférenciés (g1, SA), sur 56,05 km² ;
- Marnes à Huîtres (g1, MH), sur 21,42 km² ;
- Argiles plastiques, Fausses glaises, Sables de Breuillet (e4, APS-GA-GS) ;
- Argiles vertes de Romainville (g1, AR), sur 1,35 km² ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 0,40 km² .

Ces 6 formations classées en aléa fort représentent à l'affleurement une surface urbanisée estimée à 8,2% de la surface urbanisée totale du département (cette surface étant estimée à 226 km²), avec 14,3% des sinistres répertoriés (532 sur un total de 3724).

Les zones d'aléa moyen correspondent à 5 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles à meulière de Montmorency (p-IV, AMM) ;
- Colluvions polygéniques de versant (CE) ;
- Masses et marnes du Gypse, marnes à Pholadomies (e7, G-MP) ;
- Argiles à silex (RC) ;
- Masses et marnes du Gypse (e7, G-MP).

6) Val-d'Oise (95)

Dans le département du Val-d'Oise (Donsimoni M. et al., 2004), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 29 formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles 19 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement.

La mise en œuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées 3 classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d'affleurements de 1241 km², on constate que :

- 5,73% (71 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 13,76% (171 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 65,05% (807 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- 15,45% (192 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d'aléa fort correspondent à 4 formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles plastiques et Fausses glaises du Sparnacien (e4, SS-FG-AP), sur 26,19 km² ;
- Argiles vertes de Romainville (g1, AR), sur 22,55 km² ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 16,40 km² ;
- Marnes à Huîtres (g1, MH), sur 5,94 km² .

Ces 4 formations classées en aléa fort représentent à l'affleurement une surface urbanisée estimée à moins de 6% de la surface urbanisée totale du département (cette surface étant estimée à 158 km², pour une surface totale de 1241km² hors zones aquatiques), avec 16% des sinistres répertoriés (209 sur un total de 1328).

Les zones d'aléa moyen correspondent à 5 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Colluvions polygéniques (CE) ;
- Masses et marnes du Gypse (e7, G) ;
- Marnes à Pholadomies (e7, MP) ;
- Argiles à meulière de Montmorency (p-IV, AMM) ;
- Masses et marnes du Gypse, Marnes à Pholadomies (e7, G-MP).

7) Seine-et-Marne (77)

Dans le département de Seine-et-Marne (Donsimoni M. et al., 2006), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 52 formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles 25 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement.

La mise en œuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées 3 classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d'affleurements de 5908 km², on constate que :

- 8,20% (485 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 10,62% (482 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 56,53% (3485 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- 24,65% (1456 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d'aléa fort correspondent à 4 formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

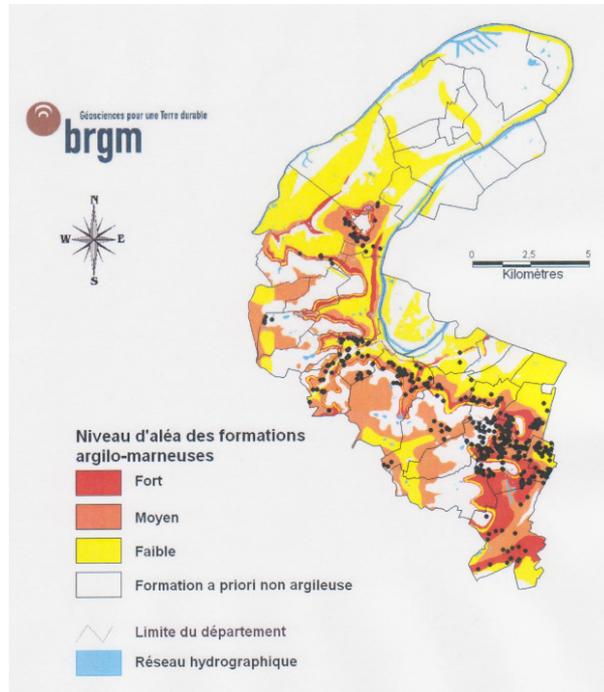
- Argiles vertes de Romainville (g1, AR), sur 261 km² ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 222 km² ;
- Marnes à Huîtres (g1, MH), sur 1,5 km² ;
- Dépôts tourbeux (T), sur 0,6 km² .

Ces 4 formations classées en aléa fort représentent à l’affleurement une surface urbanisée estimée à moins de 10 % de la surface urbanisée totale du département (cette surface étant estimée à 290 km², pour une surface totale de 5908km² hors zones aquatiques), avec 28,1% des sinistres répertoriés (1170 sur un total de 4170).

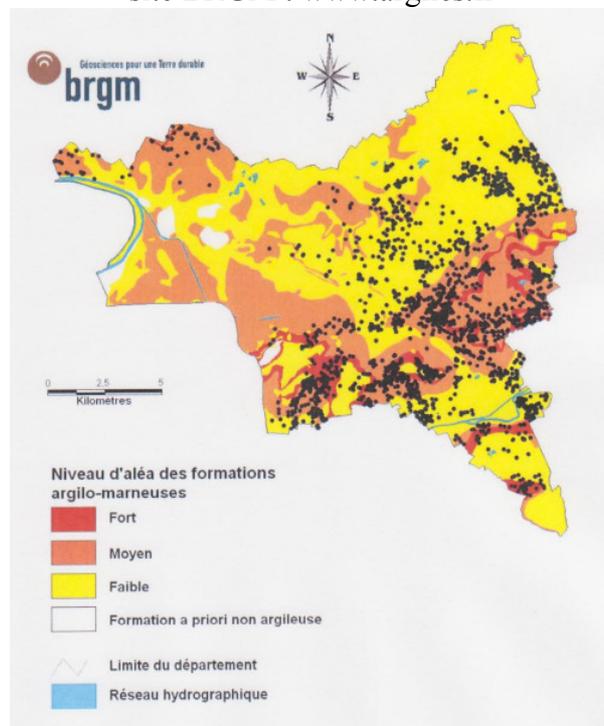
Les zones d’aléa moyen correspondent à 9 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d’affleurement décroissantes :

- Argiles à meulières de Brie (Rfv/g, AMB) ;
- Colluvions polygéniques (CE) ;
- Sables fins, pisés et argiles plastiques (e4, S) ;
- Masses et marnes du Gypse et Marnes à Pholadomies (e7, G-MP) ;
- Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies indifférenciés (e7, CCh-MP) ;
- Molasse du Gâtinais (m1, MG) ;
- Marnes supragypseuses, Formation du Gypse et Calcaire de Champigny indifférenciés (e7, G-CCh) ;
- Argiles à silex (RC) ;
- Argiles à meulières de Montmorency (p-IV, AMM).

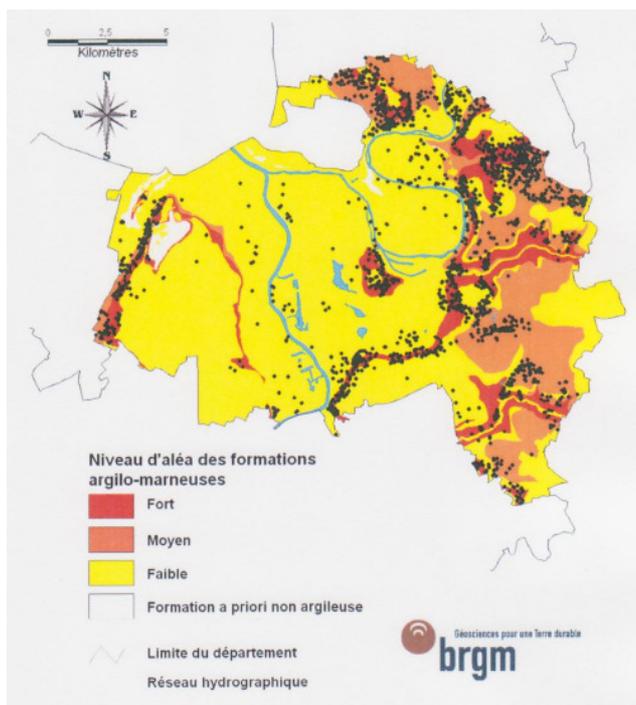
2.2.3 Présentation des cartes d'aléa des 7 départements de l'Ile-de-France (site BRGM : www.argiles.fr)



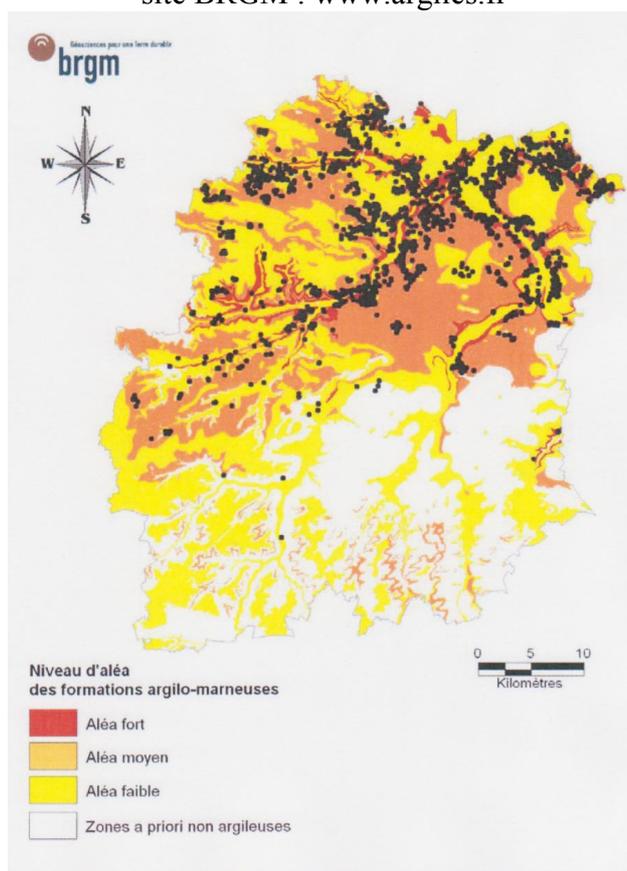
Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des Hauts-de-Seine (92)
site BRGM : www.argiles.fr



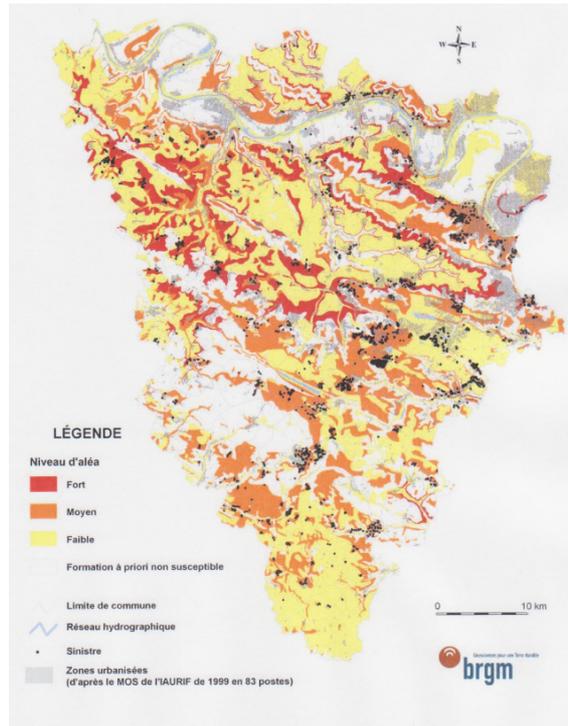
Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de Seine-Saint-Denis (93)
site BRGM : www.argiles.fr



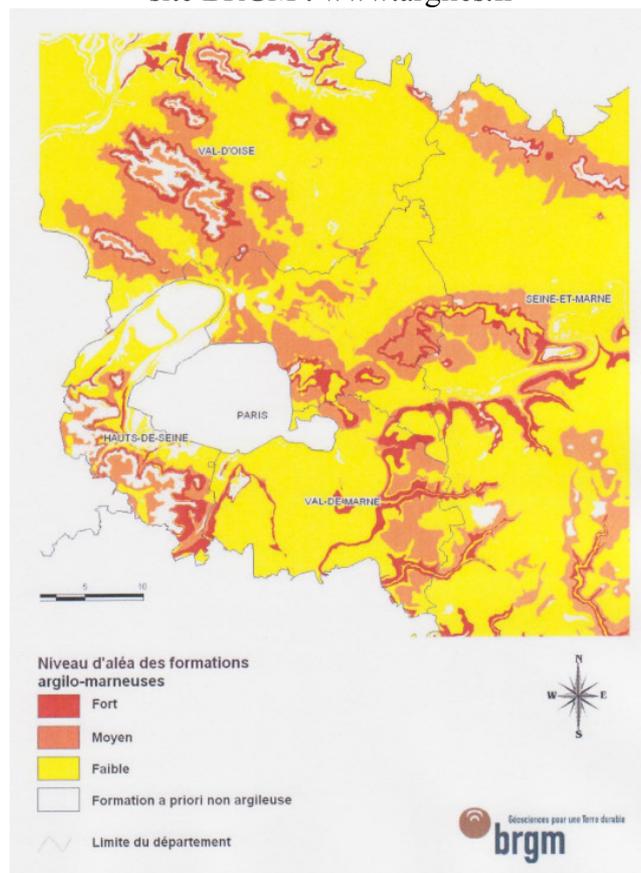
Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement du Val de Marne (94)
site BRGM : www.argiles.fr



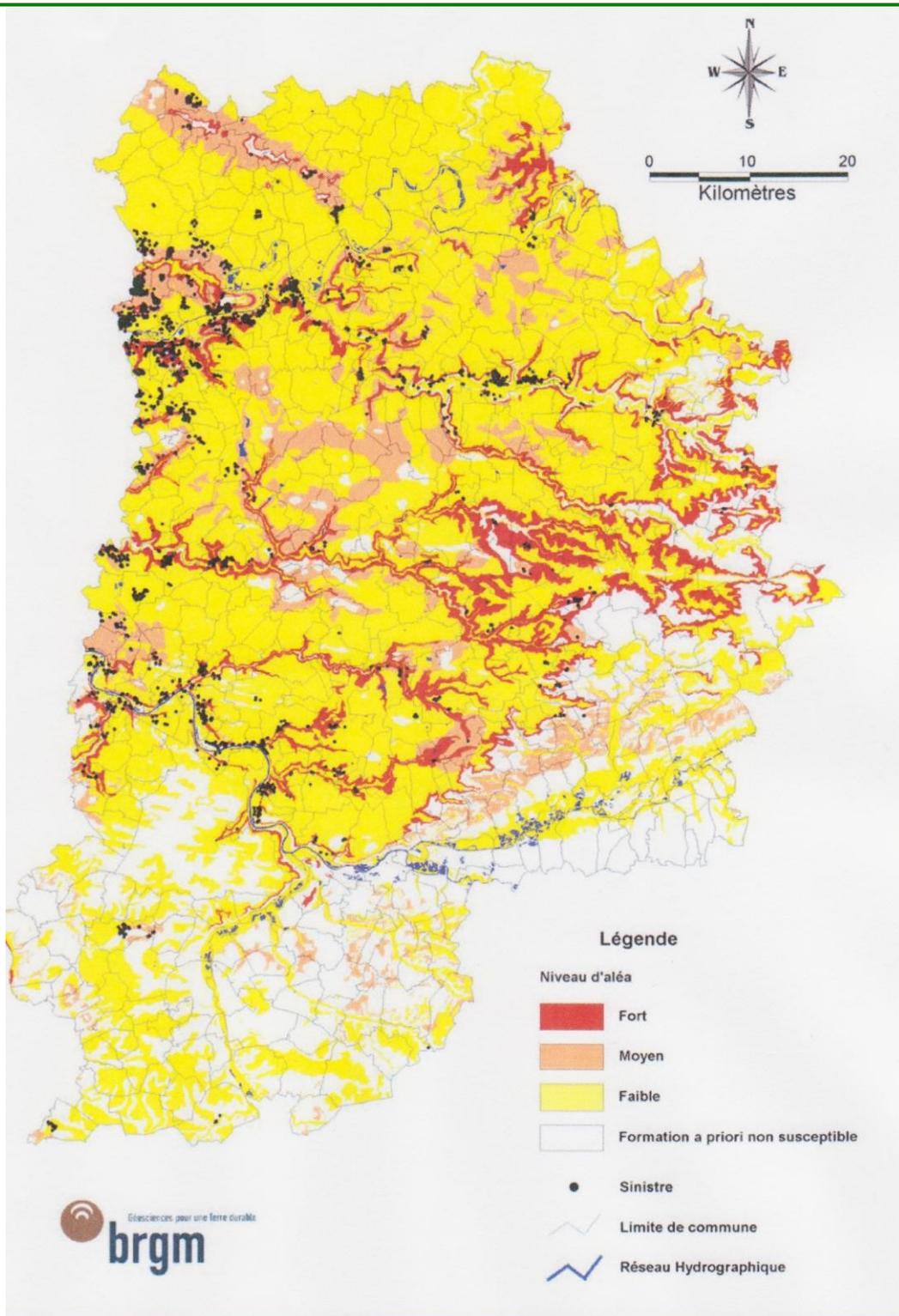
Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des Hauts-de-Seine (92)
site BRGM : www.argiles.fr



Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des Yvelines (78)
site BRGM : www.argiles.fr



Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement du val d'Oise (95) et départements limitrophes. site BRGM : www.argiles.fr



Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de Seine-et-Marne (77)
 site BRGM : www.argiles.fr

2.2.4 Conclusion

Il ressort de cette analyse une certaine constance dans l'apparition des formations géologiques classées en aléa fort, ce qui rassure sur la méthodologie mise en œuvre, qui a fait l'objet de diverses validations terrain et homogénéisations entre départements voisins. Même si toutes les formations ne sont pas également représentées dans tous les départements de l'Ile-de-France, on peut noter que les formations suivantes sont identifiées comme correspondants à un aléa fort :

- Marnes à Huîtres et Argiles à Corbules (g1, MH) : 7 cas sur 7 ;
- Argiles vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes, Calcaire de Sannois (g1, AVR) : 7 cas sur 7 ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS) : 7 cas sur 7 ;
- Marnes ludiennes (faciès de transition, e7, ML) : 3 cas sur 7 ;
- Fausses glaises, Sables d'Auteuil, Argiles plastiques, Sables de Breuillet, Conglomérat de Meudon (e4, SS-FG-AP) : 6 cas sur 7 ;
- Dépôts tourbeux (T) : 1 cas sur 7.

Ces formations ne se retrouvent jamais classées en aléa moyen, sauf cas très particulier correspondant à des variations de faciès lithologiques de ces formations et/ou des appellations voisines désignant des matériaux significativement différents.

A chacune de ces formations géologiques est rapportée une densité de sinistres (nombre de sinistres rapporté à 100 km² de surface réellement urbanisée). L'analyse de la sinistralité ne peut être homogène dans toute l'Ile-de-France. En effet, le type d'habitat (importance relative de l'habitat pavillonnaire) est globalement différent si l'on compare, d'une part, les départements de la petite couronne (92, 93, 94) limitrophes de Paris, d'autre part, les départements de la grande couronne (77, 78, 91, 95). De plus les conditions de déclaration des sinistres sont très différentes suivant que l'habitat correspond ou non à des surfaces loties. Cependant, à titre indicatif, on s'est autorisé à comparer ces valeurs de densité de sinistres par formation géologique pour l'ensemble des départements de l'Ile-de-France. On obtient les résultats suivants :

- Marnes à Huîtres et Argiles à Corbules (g1, MH) : valeurs de densité de sinistres variant de 1400 à 6200, valeur moyenne : 3400 ;
- Argiles vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes, Calcaire de Sannois (g1, AVR) : valeurs de densité de sinistres variant de 1800 à 29100, valeur moyenne : 13900 ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS) : valeurs de densité de sinistres variant de 2200 à 51000, valeur moyenne : 21900 ;
- Marnes ludiennes (faciès de transition, e7, ML) : valeurs de densité de sinistres variant de 4500 à 28000, valeur moyenne : 18800 ;
- Fausses glaises, Sables d'Auteuil, Argiles plastiques, Sables de Breuillet, Conglomérat de Meudon (e4, SS-FG-AP) : valeurs de densité de sinistres variant de 19600 à 19900, valeur moyenne : 19700.

Les formations suivantes, classées par ordre stratigraphique (du plus récent au plus ancien), sont identifiées comme correspondants à un aléa moyen, avec les valeurs de densité de sinistres suivantes :

- Alluvions récentes de la Bièvre (Fz, B) : valeurs de densité de sinistres variant de 1900 à 8600, valeur moyenne : 5200 ;
- Colluvions argileuses et colluvions polygéniques (CE-A) : valeurs de densité de sinistres variant de 1100 à 14000, valeur moyenne : 7100 ;
- Argiles à meulière de Montmorency (p-IV, AMM) : valeurs de densité de sinistres variant de 900 à 20700, valeur moyenne : 9300 ;
- Argiles à meulière de Brie (Rfv/g1, CB) : valeurs de densité de sinistres variant de 1300 à 20700, valeur moyenne : 8600 ;
- Molasse du Gâtinais (m1, MG) : valeurs de densité de sinistres : 13000 ;
- Masses et marnes du Gypse (e7, G) : valeurs de densité de sinistres variant de 2900 à 35400, valeur moyenne : 12500 ;
- Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies (e7, CCh-MP) : valeurs de densité de sinistres variant de 18200 à 24700, valeur moyenne : 20400 ;
- Marnes infragypseuses, Marnes à Pholadomies et 4^{ème} masse du Gypse (e6-7, MGC) : valeurs de densité de sinistres variant de 1000 à 28200, valeur moyenne : 7400 ;
- Sables et grès de Breuillet (e4, SG) : valeurs de densité de sinistres : 14000 ;
- Sables fins, pisés et argiles plastiques (e4, S) : valeurs de densité de sinistres variant de 400 à 2100, valeur moyenne : 1200 ;
- Argiles à silex et craie blanche à silex (RC) : valeurs de densité de sinistres variant de 2800 à 8400, valeur moyenne : 4900.

Ces éléments généraux de synthèse confirment, s'il en était besoin, l'intérêt d'une telle cartographie à l'échelle départementale. Comme indiqué supra, il est clair par ailleurs que cette cartographie doit être comprise comme participant d'une démarche de prévention par référence à l'acte de construire, qui est utile pour l'établissement des PPRN : Plans de Prévention des Risques Naturels, pour les assureurs qui trouvent là un cadre général permettant de mieux comprendre les cas de sinistres constatés dans leur pratique professionnelle, pour les maîtres d'ouvrages ainsi mieux informés des techniques constructives qui apparaîtraient nécessaires pour limiter à l'avenir les dommages au bâti.

Cette synthèse permet aussi de confirmer que le choix des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil, dans le cadre de ce projet de recherche, comme formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement était judicieux, de même que la prise en compte du cas des colluvions argileuses.

Références bibliographiques

Donsimoni M., Giraud F., avec la collab. de Hatton C., Trouillard-Perrot C., Vincent M. (2005) – *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Yvelines*. Rapport BRGM/RP-53074-FR, 287p. 7 fig., 24 tabl., 6 ann., 3 pl. h.-t.

Donsimoni M., Hatton C., Giraud F., avec la collab. de Vincent M. (2004) – *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-d'Oise*. Rapport BRGM/RP-52598-FR, 163p., 8 fig., 22 tabl., 4 ann., 4 pl. h.-t.

Donsimoni M., Kerneis M., Giraud F., avec la collab. 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, 114p., 38 fig., 3 ann., 3 pl. h.-t.

Donsimoni M., Trouillard-Perrot C., Plat E., avec la collab. de Vincent M. (2006) – *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Hauts-de-Seine*. Rapport BRGM/RP-53867-FR, 136p., 15 fig., 21 tabl., 3 ann., 3 pl. h.-t.

Plat E., Donsimoni M. et Vincent M. (2007) – *Actualisation de la carte de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne*. Rapport BRGM/RP-55525-FR, 46p. 13 fig., 2 ann., 3 pl. h.-t.

Plat E., Donsimoni M. et Vincent M. (2007) – *Actualisation de la carte de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de l'Essonne*. Rapport BRGM/RP-55526-FR, 98p. 19 fig., 2 ann., 3 pl. h.-t.

Plat E., Donsimoni M. et Vincent M. (2007) – *Actualisation de la carte de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Seine-Saint-Denis*. Rapport BRGM/RP-55527-FR, 78p. 17 fig., 2 ann., 3 pl. h.-t.

Vincent M., Plat E., Le Roy S. (2007) – *Cartographie de l'aléa Retrait-Gonflement et Plans de Prévention des Risques*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, 189-200.

Vincent M., Hédou F., Chirouze M., Plat E., Le Roy S. – *Cartographie à l'échelle départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à des fins préventives*. Symposium international Sécheresse et constructions SEC 2008. 1-3 septembre 2008. LCPC. Ed. J-P. Magnan, R. Cojean, Y-J Cui, P. Mestat. Volume 1. pp. 55-62.

3. LA CARTOGRAPHIE PPRN DU RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX EN FRANCE, LA DEMARCHE DES EXPERTS D'ASSURANCE

3.1 INTRODUCTION

Comme indiqué ci-dessus, la cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement ouvre le chemin pour une cartographie à une échelle plus locale, au travers des Plans de Prévention des Risques Naturels, appliquée au cas du retrait-gonflement des sols argileux. Cette cartographie participe d'une démarche de prévention et d'information préventive dont il est utile de rappeler les grands principes que l'on peut trouver présentés sur le site www.prim.net du MEEDDAT, en particulier dans le document : « Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? ».

L'information préventive des citoyens, sur les risques majeurs auxquels ils peuvent être soumis, est inscrite dans la loi du 22 juillet 1987, reprise dans l'article L125.2 du code de l'environnement. Les risques majeurs auxquels sont exposés les habitants d'un département sont recensés dans le DDRM (Dossier Départemental des Risques Majeurs), établi sous l'autorité du préfet. S'appuyant sur ce document, le préfet porte à la connaissance du maire les risques auxquels sont exposés les habitants de la commune. Le maire fait alors élaborer un DICRIM (Document d'Information Communale sur les Risques Majeurs), précisant les dispositions préventives et de protection qui sont prises à l'échelle communale. Par voie d'affiches le maire fait connaître aux habitants les principaux éléments se rapportant à ces risques majeurs. De même, les propriétaires de terrains ou d'immeubles doivent procéder à cet affichage. Enfin, les vendeurs et bailleurs doivent informer les acquéreurs et locataires lorsqu'un remboursement de sinistre au titre de la déclaration de catastrophe naturelle est intervenu sur la commune concernée.

3.2 LES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS

Le programme de cartographie départementale relatif à l'aléa retrait-gonflement participe de la démarche d'information du public, en particulier des propriétaires et des différents acteurs de la construction. En même temps, cette cartographie est un préalable à l'élaboration des PPRN (Plan de Prévention des Risques Naturels) au niveau communal, à l'échelle du 1/10000. Le PPRN concerne notamment toute personne sollicitant un permis de construire, le document délimitant les zones exposées au phénomène et réglementant l'occupation des sols. Des règles constructives y sont présentées, obligatoires ou recommandées, visant à réduire l'apparition de désordres au bâti. Dans les secteurs exposés, le PPRN peut imposer la réalisation d'une étude géotechnique spécifique avant tout nouveau projet de construction. Les PPRN relatifs au retrait-gonflement ne prévoient pas d'inconstructibilité, même dans les zones d'aléa fort. Dans tous les cas, le respect des règles de l'art relatives à l'acte de construire constitue une exigence minimum pour assurer la résistance nécessaire du bâti.

Le document intitulé « Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? », disponible sur www.prim.net, donne sous forme de fiches pédagogiques les principales règles relatives à l'art de construire sur sols argileux sensibles au retrait-gonflement. Ces fiches sont classées en 2 groupes : a) des fiches permettant une adaptation du bâti, permettant de s'opposer au phénomène de retrait-gonflement et ainsi minimiser les désordres au bâti (Fiches 1, 2 et 9) et b) des fiches permettant de minimiser le risque d'occurrence et l'ampleur du phénomène de retrait-gonflement (Fiches 3 à 8 et 10). On y trouve ainsi les fiches suivantes :

- Fiche 1 : Adaptation des fondations ;
- Fiche 2 : Rigidification de la structure du bâtiment ;
- Fiche 3 : Réalisation d'une ceinture étanche autour du bâtiment ;
- Fiche 4 : Eloignement de la végétation du bâtiment ;
- Fiche 5 : Création d'un écran anti-racines ;
- Fiche 6 : Raccordement des réseaux d'eaux au réseau collectif ;
- Fiche 7 : Etanchéification des canalisations enterrées ;
- Fiche 8 : Limitation des conséquences d'une source de chaleur en sous-sol ;
- Fiche 9 : Désolidarisation des différents éléments de structure ;
- Fiche 10 : Réalisation d'un dispositif de drainage.

Pour chaque fiche, le problème à résoudre est présenté, le dispositif adapté est décrit et illustré, les conditions de mise en œuvre et les mesures d'accompagnement ou alternatives sont indiquées.

Ce document reprend ou actualise des documents déjà publiés, en particulier :

- CEBTP. 1991. *Guide pratique : Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse*. Sous l'égide de AQC, APSAD, AFAC, CCR, FNB. Fascicule 1 : *Bases de référence*. 48 p., Glossaire, Fascicule 2 : *Principes et méthodologie* : 8 p., Tableaux guides, Tableaux des solutions élémentaires, Schémas de désordres et de principe de réparation, Glossaire. Fascicule 3 : *Annexes techniques*, 123 p. Edition SEDITTA, Paris.
- DPPR. 1993. *Sécheresse et construction : Guide de prévention*. 51 p. La Documentation Française.
- FFSA et GEMA. 2001. *Fascicule sécheresse*. 24 p.
- AQC (Agence Qualité Construction). 2004. *Fondations de maisons individuelles. Principales pathologies* – avec CD Rom pédagogique à partir d'études de cas concrets. *Diaporama retrait gonflement des sols argileux et brochure d'information*.

Les Plans de Prévention des Risques Naturels comportent un zonage réglementaire et un règlement. Pour l'aléa retrait-gonflement, on dispose d'un « Modèle de règlement » sur lequel notre groupe de recherche a été consulté.

En l'état, le modèle de règlement comporte 4 Titres et se présente comme suit, les points les plus importants étant repris, selon document du MEEDDAT (extraits) :

Titre I : Portée du règlement

Article 1 : Champ d'application

Le principe du zonage est décrit. Le plan de zonage comprend deux zones exposées au risque de retrait-gonflement, définies en fonction du niveau d'aléa : une zone très exposée (B1) et une zone faiblement à moyennement exposé (B2).

Les principes réglementaires sont précisés : le règlement définit :

- les conditions de réalisation, d'utilisation et d'exploitation des projets d'aménagement et de construction ;
- les mesures relatives aux biens et activités existant en vue de leur adaptation au risque ;
- les mesures plus générales de prévention, de protection et de sauvegarde qui incombent aux particuliers ou aux collectivités.

Article 2 : Effets du PPRN

Le PPRN approuvé vaut servitude d'utilité publique. A ce titre il doit être annexé au Plan Local d'Urbanisme (PLU). Les mesures prescrites dans le règlement doivent être mises en œuvre sous la responsabilité du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre.

Article 3 : Dérogations aux règles du PPRN

Les dispositions du règlement ne s'appliquent pas si l'absence d'argile sur l'emprise de la totalité de la parcelle est démontrée par sondage selon une étude géotechnique au minimum de type G11 (étude géotechnique préliminaire de site) au sens de la norme NF P 94-500.

Titre II : Réglementation des projets

Chapitre 1 - Mesures générales applicables aux projets de construction de bâtiments

Article 1 : Est prescrit en zones B1 et B2

Une série d'études géotechniques sur l'ensemble de la parcelle est prescrite afin de définir les dispositions constructives et environnementales nécessaires pour assurer la stabilité des bâtiments vis-à-vis du risque de tassement différentiel. Ces études correspondent à des missions géotechniques de type G12 (étude géotechnique d'avant-projet), G2 (étude géotechnique de projet) et G3 (étude et suivi géotechnique d'exécution) au sens de la norme géotechnique NF P 94-500. Toutes les dispositions et recommandations issues de ces études doivent être appliquées.

Chapitre 2 - Mesures particulières applicables aux constructions de maisons individuelles et de leurs extensions

Maison individuelle s'entend au sens de l'article L.231-1 du Code de la Construction et de l'Habitation : construction d'un immeuble à usage d'habitation ou d'un immeuble à usage professionnel et d'habitation ne comportant pas plus de deux logements.

Article 2 : Est prescrit en zones B1 et B2 : en l'absence d'études géotechniques, il est prescrit la réalisation de l'ensemble des règles forfaitaires définies aux articles 2-1 et 2-2.

Article 2-1 : Règles de construction

Article 2-1-1 : Est interdit : l'exécution d'un sous-sol sous une construction d'un seul tenant, sauf mise en place d'un joint de rupture.

Article 2-1-2 : Sont prescrites les mesures suivantes :

- Des fondations d'une profondeur minimum de 1,20 m en zone B1 et 0,80 m en zone B2, sauf rencontre de terrains rocheux insensibles à l'eau à une profondeur inférieure.
- Des fondations plus profondes à l'aval qu'à l'amont pour les terrains en pente, afin d'assurer une homogénéité de l'ancrage.
- Des fondations continues, armées et bétonnées à pleine fouille, dimensionnées selon les préconisations du DTU 13-12 « Règles pour le calcul des fondations superficielles » et réalisées suivant les préconisations du DTU 13-11 « Fondations superficielles – cahier des clauses techniques » lorsqu'elles sont sur semelles.
- Toutes parties de bâtiment fondées différemment et susceptibles d'être soumises à des tassements différentiels doivent être désolidarisées et séparées par un joint de rupture sur toute la hauteur de la construction.
- Les murs porteurs doivent comporter un chaînage horizontal et vertical liaisonné, dimensionné et réalisé suivant les préconisations du DTU 20-1 « Ouvrages de maçonnerie en petits éléments : Règles de calcul et dispositions constructives minimales ».
- Si le plancher bas est réalisé sur radier général, la réalisation d'une bêche périphérique est prescrite. S'il est constitué d'un dallage sur terre plein, il doit être réalisé en béton armé, après mise en œuvre d'une couche de forme en matériaux sélectionnés et compactés selon les préconisations du DTU 13-3 : « Dallages : conception, calcul et exécution ». Des dispositions doivent être prises pour atténuer le risque de tassements différentiels vis-à-vis de l'ossature de la construction et de leurs conséquences, notamment sur les refends, cloisons, doublages et canalisations. Les solutions de type plancher porté sur vide sanitaire et sous-sol total doivent être privilégiées.
- En cas d'implantation d'une source de chaleur en sous-sol (chaudière ou autre), celle-ci ne devra pas être positionnée le long des murs périphériques du sous-sol. A défaut, il devra être mis en place un dispositif spécifique d'isolation des murs.

Article 2-2 : Dispositions relatives à l'environnement immédiat des projets de bâtiments

Les dispositions suivantes réglementent l'aménagement des abords immédiats des bâtiments à la fois pour les zones B1 et B2. Elles ont pour objectif de limiter les risques de retrait-gonflement par une bonne gestion des eaux superficielles et de la végétation.

Article 2-2-1 : Sont interdits : toute plantation d'arbre ou d'arbuste à une distance de tout bâtiment existant, ou du projet, inférieure à leur hauteur à maturité (1,5 fois en cas d'un rideau d'arbres ou d'arbustes) sauf mise en place d'un écran anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m interposé entre la plantation et les bâtiments.

Article 2-2-2 : Sont prescrits :

- La mise en place de dispositifs assurant l'étanchéité des canalisations d'évacuation des eaux usées et pluviales (raccords souples notamment).

- La récupération et l'évacuation des eaux pluviales et de ruissellement des abords du bâtiment par un dispositif d'évacuation de type caniveau éloigné à une distance minimale de 1,50 m de tout bâtiment.
- Le captage des écoulements de faible profondeur, lorsqu'ils existent, par un dispositif de drainage périphérique à une distance minimale du bâtiment de 2 m.
- Le rejet des eaux pluviales et usées et des dispositifs de drainage dans le réseau collectif lorsque cela est possible. En cas d'assainissement autonome, le rejet doit être fait à l'aval du bâtiment et à une distance minimale d'éloignement de 10 m de tout bâtiment.
- La mise en place sur toute la périphérie du bâtiment, à l'exception des parties mitoyennes avec un terrain déjà construit ou revêtu, d'un dispositif s'opposant à l'évaporation (terrasse ou géomembrane enterrée par exemple) et d'une largeur minimale de 1,5 m.
- La mise en place d'écrans anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m entre le bâtiment projeté et tout arbre ou arbuste existant situé à une distance inférieure à sa propre hauteur à maturité ou, à défaut, l'arrachage des arbres concernés.

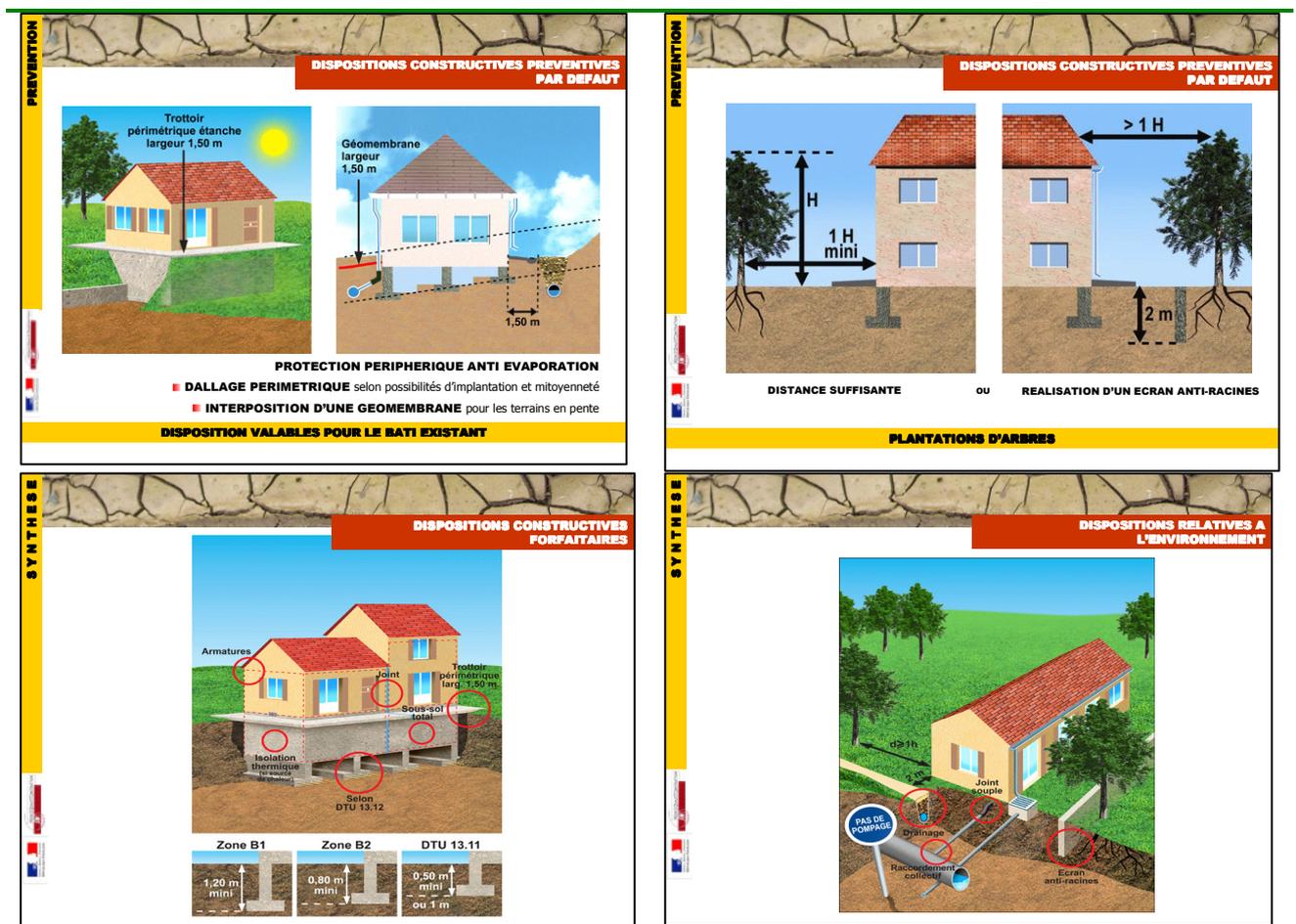


Figure 3.2.1: Fondations de maisons individuelles. Des désordres aux bonnes pratiques. CDRom AQC (Agence Qualité Construction), novembre 2004. <http://www.qualiteconstruction.com>

Article 3 : Est recommandé

Le respect d'un délai minimal de 1 an entre l'arrachage des arbres ou arbustes situés dans l'emprise du projet et à son abord immédiat et le démarrage des travaux de construction, lorsque le déboisement concerne des arbres de grande taille ou en nombre important.

Titre III : Mesures applicables aux biens et activités existants

Cette partie du règlement définit les adaptations qui doivent être effectuées par les propriétaires sur les biens construits ou aménagés avant l'approbation du PPRN. Il s'agit de dispositions visant à diminuer les risques de désordres par le retrait-gonflement des argiles en limitant les variations de teneur en eau dans le sol sous la construction et à sa proximité immédiate. Les mesures indiquées n'incombent qu'aux propriétaires des biens de types « maisons individuelles » au sens de l'article L.231-1 du Code de la Construction et de l'Habitation.

Article 1 : Sont prescrites dans un délai de 5 ans en zone B1 et recommandées en zone B2 : la collecte et l'évacuation des eaux pluviales des abords du bâtiment par un système approprié dont le rejet sera éloigné à une distance minimale de 1,50 m de tout bâtiment.

Article 2 : Sont recommandées en zones B1 et B2 les mesures suivantes :

- La mise en place d'un dispositif s'opposant à l'évaporation (terrasse ou géomembrane enterrée) et d'une largeur minimale de 1,50 m sur toute la périphérie du bâtiment, à l'exception des parties mitoyennes avec un terrain déjà construit ou revêtu.

Titre IV : Mesures de prévention, de protection et de sauvegarde

Article 1 : Est prescrit en zone B1 et recommandé en zone B2 : L'élagage régulier (au minimum tous les 3 ans) de tous arbres ou arbustes implantés à une distance de toute maison individuelle inférieure à leur hauteur à maturité, sauf mise en place d'un écran anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m interposé entre la plantation et les bâtiments.

Article 2 : Sont prescrites les mesures suivantes en zones B1 et B2 et sont immédiatement applicables :

- Toute nouvelle plantation d'arbres doit respecter une distance d'éloignement par rapport à tout bâtiment au moins égale à la hauteur de la plantation à maturité (1,5 fois en cas d'un rideau d'arbres ou d'arbustes) ou être accompagnée de la mise en place d'un écran anti-racines d'une profondeur minimale de 2 m interposé entre la plantation et les bâtiments.
- La création d'un puits pour usage domestique doit respecter une distance d'éloignement de tout bâtiment d'au moins 10 m.
- En cas de remplacement des canalisations d'évacuation des eaux usées et/ou pluviales, il doit être mis en place des dispositifs assurant leur étanchéité (raccords souples notamment).
- Tous travaux de déblais ou de remblais modifiant localement la profondeur d'encastrement des fondations doivent être précédés d'une étude géotechnique de

type G12 au sens de la norme NF P 94-500, pour vérifier qu'ils n'aggraveront pas la vulnérabilité du bâti.

Article 3 : Sont recommandés en zones B1 et B2

- Les contrôles réguliers d'étanchéité des canalisations d'évacuation des eaux usées et pluviales existantes et leur étanchéification en tant que de besoin, cette recommandation concernant les particuliers et les gestionnaires de réseaux.
- Ne pas pomper d'eau entre mai et octobre, dans un puits situé à moins de 10 m d'un bâtiment existant, lorsque la profondeur du niveau de l'eau (par rapport au terrain naturel) est inférieure à 10 m.

Plusieurs des prescriptions ou recommandations de ce règlement sont illustrées en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

3.3 L'ASSURANCE FACE AUX DOMMAGES AUX CONSTRUCTIONS LIES A LA SECHERESSE

3.3.1 Le cadre général (d'après Toulemont M. et Cojean R., 2007)

L'importance des dommages dus aux phénomènes de retrait/gonflement des sols argileux depuis 1989 et la quasi-certitude de leur renouvellement en cas de nouveaux épisodes de sécheresse intense et durable, ont conduit à la mise en œuvre d'une politique de prévention destinée à réduire le niveau de sinistralité.

Les principales périodes de sécheresse ayant entraîné des dommages au bâti clairement identifiés sont connues : période 1989/1992, période 1996/1997, année 2003. De 1989 à 2002, le coût global d'indemnisation (dans le cadre du régime d'indemnisation Catastrophes Naturelles ou Cat-Nat) a été d'environ 3 milliards d'euros, selon la CCR (Caisse Centrale de Réassurance), en deuxième poste de dépenses après les indemnisations concernant le risque inondation (Figure 3.3.1, Figure 3.3.2).

La profession : maîtres d'œuvre, entreprises, géotechniciens, assureurs, s'est très tôt intéressée à ce sujet technique avec différentes actions entreprises sous l'égide des ministères de l'environnement ou de l'écologie. Ainsi, il faut rappeler que l'Agence Qualité Construction (AQC) a fait réaliser en 1990, par un réseau d'experts, une enquête statistique sur 356 bâtiments sinistrés, afin de préciser les causes de pathologie des maisons individuelles. En 1991, le CEBTP (Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics) a réalisé une enquête sur 412 bâtiments endommagés par la sécheresse géotechnique. Ces études ont permis d'identifier le profil de la construction sinistrée. Il s'agit d'une maison individuelle en rez-de-chaussée (72%), avec dallage sur terre plein (68%), fondée entre 0,40 m et 0,80 m de profondeur (77%), sur un sol argileux (97%) et avec des arbres à proximité (30%). Il en a résulté, sous l'égide des organismes : AQC, APSAD, AFAC, CCR et FNB, l'édition d'un guide pratique sur « La détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse » (CEBTP, 1991). La Revue Française de Géotechnique a publié un article consacré au retrait-gonflement des argiles dans le N° 57 (octobre 1991) puis un ensemble de cinq articles dans le N° 58 (janvier 1992) passant en revue les aspects scientifiques et techniques du problème et

présentant les conditions d'application de la loi du 13 juillet 1982 sur l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles.

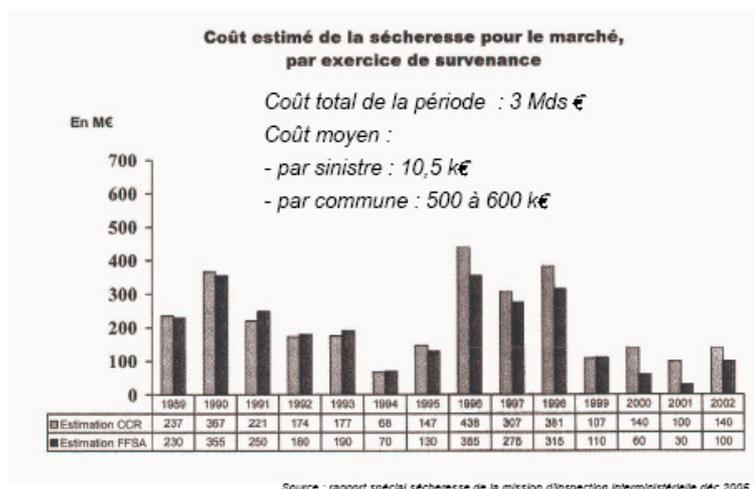


Figure 3.3.1: Coût estimé de la sécheresse entre 1989 et 2002 (estimations CCR et FFSA), in R. Nussbaum (ppt, séance technique CFGI-CFMS, 18-01-2007)

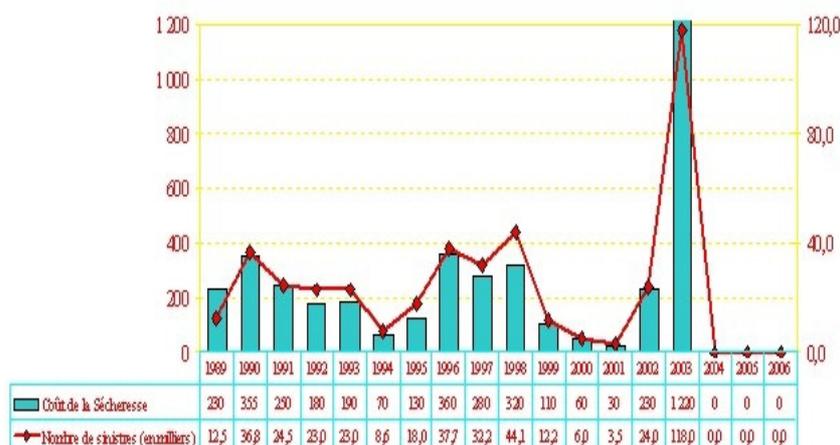


Figure 3.3.2: Coût de la sécheresse (échelle gauche, en millions d'euros) et nombre de sinistres (échelle droite, en milliers de sinistres), entre 1989 et 2006, d'après FFSA

En 1993, la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) du Ministère de l'Environnement a publié, à la Documentation Française, un guide de prévention « Sécheresse et construction » (DPPR, 1993) présentant des recommandations à l'usage des constructeurs et énonçant les principes d'une cartographie de l'aléa et du risque sécheresse géotechnique. Ce guide, tiré à 5000 exemplaires, a été transmis en 1998 aux préfets des départements concernés et à l'ensemble des maires des communes reconnues sinistrées par arrêté interministériel portant constatation de l'état de catastrophe naturelle.

En 1993, la DPPR a établi un document présentant la méthodologie d'une cartographie de l'aléa « sensibilité des sols à la sécheresse » et la carte correspondante au 1/1.000.000. Quatre

classes d'aléa étaient distinguées, prenant en compte les caractéristiques lithologiques et géotechniques des formations géologiques ainsi que leur degré d'homogénéité et prenant appui sur l'analyse en retour des conséquences des événements « sécheresse géotechnique » disponibles à cette époque, au vu des dossiers des communes reconnues sinistrées par arrêté interministériel dans le cadre du régime d'indemnisation Cat-Nat (Toulemont et al., 1994). Cette cartographie préfigurait la cartographie départementale actuellement en cours sur l'ensemble du territoire. En 1995, dans le cadre de la procédure spécifique de prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire, au plan réglementaire, la DPPR du Ministère de l'Ecologie et du développement durable (MEDD) a lancé la réalisation des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN). A la suite des sécheresses pluriannuelles de 1989-1992, de 1996-1997, puis de la canicule de 2003, le MEDD (devenu MEEDDAT) a mandaté le BRGM afin d'établir la cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement au 1/50 000ème sur la France entière (Vincent, 2003).

Les assureurs ont aussi progressivement apporté leur contribution à cette démarche d'information (MAIF, 2000, FFSA et GEMA, 2001).

Enfin, le document intitulé « Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ? », disponible sur www.prim.net, paru en 2008, donne sous forme de fiches pédagogiques les principales règles relatives à l'art de construire sur sols argileux.

Le Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement (CFGI) a réalisé plusieurs séances techniques relatives au thème des sols sensibles à la sécheresse : en janvier 1991 sur le thème « Sécheresse, terrains argileux et fondations », puis en janvier 2003 sur le thème « Sols sensibles à l'eau, retours d'expérience ». En janvier 2007 une journée technique CFGI-CFMS était organisée sur le thème « Sécheresse géotechnique », accueillant plus de 150 participants. En novembre 2008 a été organisé le symposium international Sécheresse et Constructions 2008 (SEC 2008) qui a conduit à l'édition d'un ouvrage rassemblant 54 communications couvrant tous les thèmes techniques et scientifiques en rapport avec la sécheresse géotechnique.

L'établissement des PPR Sécheresse géotechnique et la définition d'un règlement adapté à ce type d'aléa reste aujourd'hui encore un sujet de concertation entre spécialistes. Il faut noter que l'importance des dégâts immobiliers durant les dernières décennies et les risques de nouvelles périodes de sécheresse ont conduit à prendre en compte la nécessité d'une politique d'information volontariste en direction des collectivités territoriales, compte tenu de leur responsabilité en matière de prévention.

Depuis la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels, les maires doivent en effet informer périodiquement, tous les 2 ans, la population dans le cas de l'existence d'un PPRN, pour une meilleure prise en compte des mesures de prévention. En situation d'attente de réalisation de PPRN, il a été jugé important de signaler à l'ensemble des maîtres d'ouvrage, constructeurs de pavillons, professionnels du bâtiment, assureurs, les dispositions de prévention et de protection des constructions par une information systématique et des actions de communication adaptées. C'est pourquoi le MEDD (devenu MEEDDAT) a décidé en 2004 de conduire des actions concertées avec l'Agence Qualité Construction (AQC) dont la mission essentielle est de réduire la sinistralité du bâti dans les

années à venir et d'améliorer la qualité des constructions. L'AQC informe, sensibilise et motive l'ensemble des professionnels engagés dans l'acte de construire en leur faisant connaître les dispositions techniques d'ordre préventif spécifiques au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.

Aujourd'hui, compte tenu de la quasi certitude, selon le GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Etude du Climat), du réchauffement climatique et de ses répercussions sur les phénomènes de sécheresse, il apparaît 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 (Durand, 2007). D'une façon générale, d'après ce rapport, la concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter dans l'atmosphère, en particulier 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 (Bard E., 2006 ; IPCC-GIEC, 2007).

On peut donc craindre, sous les latitudes des pays tempérés, que des processus actuellement connus mais se présentant avec de faibles intensités et des effets limités, viennent à se développer dans le futur avec de plus fortes intensités et des effets autrement dommageables, analogues à ce qui est observé aujourd'hui sous de plus basses latitudes.

3.3.2 L'intervention des experts d'assurance (d'après Roume C., 2007)

C'est dans ce contexte, d'une grande complexité technique, que doivent intervenir les experts d'assurance.

L'expert d'assurance doit s'appuyer sur un savoir-faire technique (connaissances de la pathologie du bâti, des interactions terrain-fondation, de la géotechnique) mais aussi sur des qualités d'observation, ainsi que de pédagogie dans ses échanges avec les différents intervenants et en particulier les assurés.

La mise au point du Guide méthodologique de l'expertise sécheresse (MAIF, 2000), puis celle du Fascicule Sécheresse 2001 (FFSA, GEMA) ont permis de structurer l'intervention de l'expert d'assurance. Celui-ci doit élaborer un rapport-type dans lequel il doit décrire la pathologie du bâti constaté et argumenter les causes possibles de cette pathologie, en rapport ou non avec la sécheresse géotechnique. Ce document facilite la gestion des dossiers, de même que les relations entre assureurs lorsque, le sinistre s'étendant sur une longue période, plusieurs assureurs successifs sont intervenus (C. Roume, 2007). L'expert d'assurance doit gérer plusieurs types de questions, techniques ou non, dans sa relation avec l'assuré.

C. Roume rappelle que les arrêtés CatNat, stipulent dans leur préambule que : « La garantie CatNat est accordée lorsque les dommages matériels directs, qui résultent de la sécheresse, ont eu pour cause déterminante l'effet de cet agent naturel, et que les mesures habituelles à prendre, pour prévenir ces dommages, n'ont pas pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises ».

Ainsi il est indiqué que relèvent des « dommages directs » :

- Les frais d'études géotechniques pour instruire le sinistre de l'habitation considérée ;
- Les travaux de remise en état ;
- Les travaux de confortement destinés à éviter l'aggravation immédiate des désordres ;
- Les travaux de déblai et de démolition ;
- Les honoraires d'architecte, de bureau d'études et de contrôle technique, si entérinés par l'expert d'assurance ;
- Le coût de la prime « assurance-ouvrage ».

A l'inverse, ne relèvent pas des « dommages directs » :

- Les pertes de loyers ;
- Les pertes d'usage ;
- Les frais de déplacement du mobilier ;
- Les honoraires d'expert d'assuré.

C. Roume souligne que l'identification de « la cause déterminante » et des « mesures habituelles ... » constitue un défi majeur pour l'expert d'assurance, avec des conséquences très fortes pour l'assuré. Ce diagnostic de l'expert d'assurance doit être établi en concertation avec le géotechnicien, l'étude géotechnique, une fois réalisée, restant soumise à l'appréciation de l'expert.

Dans le détail, l'expert d'assurance est conduit à classer les désordres observés en 5 catégories :

- Cat.1 : Désordres non imputables à la sécheresse ;
- Cat. 2 : Désordres ne nécessitant qu'un traitement des fissures ;
- Cat. 3 : Désordres nécessitant de réparer les fondations et/ou les superstructures ;
- Cat. 4 : Désordres nécessitant de créer des fondations spéciales ou de mettre en œuvre tout autre moyen permettant de stabiliser le sol ;
- Cat. 5 : Sinistre total : bâtiment économiquement irréparable.

Suivant l'importance des dommages, l'expert établit un « rapport simplifié » (désordres de catégories 1 ou 2) ou un « rapport de reconnaissance sécheresse » plus détaillé, pouvant orienter vers des investigations in situ (vérification des réseaux, reconnaissance des fondations), des mesures conservatoires (rebouchage de fissures en cas de risques d'infiltration, réparations de canalisations, abattage d'arbres), une mise en observation de l'immeuble sur un cycle de saisons (avec pose de jauges de déformation), une intervention d'un géotechnicien jouant le rôle de sapiteur pour l'expert (mission géotechnique de type G0 pour les sinistres de catégorie 2, voire 1, mission géotechnique de type G5 partielle pour les sinistres de catégorie 3, 4 ou 5). Le déroulement de l'expertise conduit ensuite à la préconisation de solutions techniques de réparation (traitement des conséquences dommageables, renforcement des superstructures, reprise en sous-œuvre des fondations, réalisation de trottoirs périphériques, réparation des canalisations, mise en place d'écrans anti-racines, abattage d'arbres ou arbustes). Des entreprises qualifiées sont ensuite consultées.

Le rapport d'expertise définitif présente *in fine* des informations à caractère administratif, des précisions sur la construction, son environnement et les désordres constatés, l'avis de l'expert sur les suites à donner au sinistre. Ce rapport conduit l'expert et son mandant à présenter au sociétaire les conclusions d'une expertise réalisée suivant les règles de l'art.

C. Roume (2007) signale tout un ensemble de points durs à lever, dans son intervention, face à l'assuré :

- Un arrêté de catastrophe naturelle étant pris sur une commune, les désordres au bâti ne sont pas nécessairement dus à la sécheresse, même si ces désordres sont apparus pendant la période visée par l'arrêté.
- Une mise sous observation du bâti peut s'avérer nécessaire pour affiner le diagnostic.
- Une neutralisation de la végétation, qui peut s'avérer essentielle, est toujours mal acceptée, d'autant plus si cette végétation est dans la parcelle mitoyenne.
- La mise en œuvre de solutions techniques, telles que trottoir périphérique ou écran anti-racines, contribuant à limiter les effets de la sécheresse sans les supprimer totalement, est difficile à préconiser.
- Les contrôles sur les réseaux de distribution d'eaux pluviales et/ou d'eaux usées enterrés rallonge l'établissement du diagnostic.
- Des configurations particulières (effets de groupe sur des ensembles pavillonnaires, de fondation identique, avec des désordres liés à la sécheresse variables, entre pavillons au centre de l'ensemble et pavillons en bordure) conduisent à des préconisations complexes, difficiles à expliquer aux assurés.
- Une mise en œuvre des études géotechniques, si nécessaires, longue.
- La complexité de certaines situations pour lesquelles le diagnostic final peut être techniquement difficile.

Il y a donc un partage des responsabilités, en théorie bien établi, entre les différents intervenants dans une situation de dommages au bâti en rapport avec la sécheresse, situation dans laquelle l'expert d'assurance joue un rôle clé.

Références bibliographiques

AQC (Agence Qualité Construction). 2004. *Fondations de maisons individuelles. Principales pathologies* - CD Rom Pédagogique à partir d'études de cas concrets. Diaporama retrait gonflement des sols argileux et brochure d'information.

Bard E. 2006. *L'Homme face au climat*. Collège de France, Odile Jacob éd . 446p., Paris.

CEBTP. 1991. *Guide pratique : Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse*. Sous l'égide de AQC, APSAD, AFAC, CCR, FNB. Fascicule 1 : Bases de référence. 48p., Glossaire. Fascicule 2 : Principes et méthodologie : 8p., Tableaux guides, Tableaux des solutions élémentaires, Schémas de désordres et de principe de réparation, Glossaire. Fascicule 3 : Annexes techniques, 123p. Edition SEDITTA, Paris.

DPPR. 1993. *Sécheresse et construction : Guide de prévention*. 51p. La Documentation Française.

Durand F. 2007. *Le réchauffement climatique en débats*. 188p. Collection Ellipse.

FFSA et GEMA. 2001. *Fascicule sécheresse*. 24p.

IPCC – GIEC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. 18p.

Magnan J.P., Cojean R., Cui Y.J., Mestat P. Ed. 2008. *Symposium international Sécheresse et Construction (SEC 2008)*. Volume 1. Publication du LCPC. 444p.

MAIF. 2000. *La méthodologie de l'expertise « sécheresse »*. 19p. et Annexes.

MEEDDAT. 2008. *Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ?*. 28p.

Nussbaum R. *Diaporama* Séance technique CFGI-CFMR, 18 janvier 2007.

Revue Française de Géotechnique n°57. octobre 1991.

Revue Française de Géotechnique n°58. janvier 1992.

Roume C. 2007. *Retour d'expérience en matière d'expertise dans le cadre des dossiers « Sécheresse et réhydratation des sols » relatifs à l'habitat pavillonnaire*. Revue Française de Géotechnique n° 120-121. pp 221-224.

Toulemont M., Cojean R., Faccendini J-P. 1994. *Cartographie prévisionnelle des sols sensibles à la sécheresse : un outil d'information préventive*. Mappemonde 4/94. pp2-5.

Toulemont M., Cojean R. 2007. *La prévention des risques liés à la sécheresse géotechnique : une expérience transposable à d'autres aléas*. Revue Française de Géotechnique n° 120-121. pp 215-219.

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. Actes du Colloque, 7 p.

4. SYNTHÈSE DES RESULTATS RELATIFS AUX CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES, MICROSTRUCTURALES, GEOTECHNIQUES, HYDRIQUES ET MECANIQUES DES ARGILES VERTES DE ROMAINVILLE ET DES MARNES BLEUES D'ARGENTEUIL

Ce rapport synthétise l'ensemble des résultats des essais de laboratoire réalisés durant toute la période couvrant le projet de recherche « Aléa et Risque Sécheresse ». Il comprend une présentation des formations étudiées, la caractérisation minéralogique, la caractérisation géotechnique, les caractéristiques hydriques, les caractéristiques microstructurales, le comportement sous sollicitations mécaniques et hydriques (Tâche 3). Deux paragraphes complètent cette analyse synthétique : l'un consacré au comportement hydrique sous sollicitations cycliques « dessiccation-humectation », l'autre consacré à l'analyse de la fissuration et à son évolution au cours des cycles successifs (Tâche 4).

L'ensemble des publications réalisées par Armines-Centre de Géosciences concernant cette étude expérimentale est regroupé dans le volume II : « Annexes », chapitre 2. Ces publications concernent notamment les techniques de caractérisation géotechnique, l'analyse des comportements mécaniques des formations soumises à des sollicitations hydriques cycliques, la réponse microstructurale des matériaux à ces sollicitations et la comparaison des comportements entre l'état intact et l'état remanié au laboratoire.

4.1 PRESENTATION

Les sols étudiés proviennent de deux formations de la région parisienne : les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil. Ces deux formations ont été échantillonnées dans deux carrières de la région parisienne : l'une située à l'Est de Paris, la carrière de Villeparisis-Le Pin et l'autre située à l'Ouest, la carrière de Cormeilles-en-Paris.

Afin de disposer d'échantillons dont les caractéristiques hydriques sont 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 (et un échantillon prélevé 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 4.1.1 et le Tableau 4.1.2

Nom de l'échantillon	Description	Niveaux/profondeur de prélèvement
E- AVR- 1	Argiles vertes, hétérogènes, fréquemment interrompues par des niveaux silteux, micro-fissurées	Partie supérieure (8- 10 m)
E- AVR- 0	Argiles vertes, beaucoup plus homogènes, micro-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 4.1.1 : 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	Profondeur	Epaisseur de la formation	Niveaux de prélèvement
W- AVR- 1	Argiles vertes, plastiques, hétérogènes, présentant des intercalations de lits fins silteux, micro-fissurées	60 – 65m	6m	Partie supérieure
W- AVR- 0	Argiles vertes, plastiques, beaucoup plus homogènes, micro-fissurées			Partie inférieure
W- MBA- 1	Marnes gris-bleu	80m	9m	Partie supérieure
W- MBA- 0	Marnes grises, très fermes, massives			Partie inférieure

Tableau 4.1.2 : Argiles vertes de Romainville et Marnes bleues d’Argenteuil de l’Ouest de Paris (carrière de Cormeilles-en-Parisis, 95)

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 4.1.3 et le Tableau 4.1.4.

La base des deux séries de prélèvement correspond au contact Glaises à Cyrènes - 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 certaine homogénéité de faciès entre l'Est et l'Ouest du Bassin parisien.

Log Argiles vertes de Romainville – Villeparisis-Le Pin (E-AVR) (numérotation des prélèvements de bas en haut)		
N Echantillons	Hauteur (cm)	Descriptions
0	0	Transition GàC-AVR couleur gris-ocre, quelques passées rouilles
1	10	Plus homogènes, verdâtres. Lits grisâtres infracentimétriques
2	20	Plus verdâtres, présence de slickensides, quelques passages ocres
3	30	Niveau rouille à la base. Verdâtres avec quelques passages ocres
4	40	Verdâtres, argilo-silteuses, plastiques
5	50	Argiles plastiques homogènes
6	60	Idem
7	70	Idem
8	80	Idem

9	90	Idem, taches de couleur rouille à noire
10	100	Présence de slikensides
11	110	Argiles plastiques, homogènes, couleur gris-verdâtre
12	120	Niveau à nodules et plages carbonatées
13	130	Homogènes, quelques nodules blancs
14	140	Homogènes plastiques
15	150	Homogènes plastiques, présence de quelques nodules
16	160	Idem
17	170	Idem
18	180	Plastiques, verdâtres, auréoles ocres
19	190	Vert intense, présence de radicelles
20	200	Lits infra-millimétriques, argiles silteuses
21	210	Hétérogènes, moins plastiques, lits blanchâtres
22	220	Nombreux nodules
23	230	Plastiques, couleur verte, homogènes
24	240	Plastiques, couleur vert intense, présence de gros nodules (non prélevés)
25	250	Plastiques, homogènes, couleur vert-bleutée
26	260	Plastiques, couleur verte, présence de slickensides
27	270	Hétérogènes, coloration ocre
28	280	Plastiques, homogènes, couleur verte
29	290	Plastiques, homogènes, couleur verte, quelques lits ocres
31	310	Bariolées
33	330	Bariolées
35	350	Bariolées, présence de lits blancs et de nodules
37	370	Bariolées

Tableau 4.1.3 : Log de la formation des Argiles vertes de Romainville de Villeparisis-Le Pin : descriptif de chaque prélèvement.

Log Argiles vertes de Romainville – Cormeilles-en-Parisis (W-AVR) (numérotation des prélèvements de bas en haut)		
N Echantillons	Hauteur (cm)	Descriptions
1	0	Base Argiles vertes litées : intercalations de lits fins carbonatés et de lits argileux plastiques
2	20	AV litées, présence de mud-cracks
3	40	AV massives homogènes compactes plastiques, couleur vert foncé
4	60	Idem
5	80	Idem
6	100	Idem
7	120	AV litées, lits fins carbonatés
8	140	AV litées, lits carbonatés, présence de fossiles
9	160	AV vertes, homogènes très plastiques
10	180	AV litées, lits espacés

11	200	AV plus homogènes quelques lits espacés
12	220	Plastiques, homogènes, présence de lits fins carbonatés
13	240	Idem
14	260	Idem
15	280	Idem
16	300	Idem
17	320	Idem
18	340	Idem
	350	Calcaire
19	380	AV homogènes, contact avec banc calcaire (3cm)
20	400	Intercalation d'un niveau noir
21	420	AV homogènes traces noires
22	440	AV moins plastiques vert-noirâtres
	+3	

Tableau 4.1.4 : Log de la formation des Argiles vertes de Romainville de Cormeilles-en-Parisis : descriptif de chaque prélèvement.

4.2 CARACTERISATION MINERALOGIQUE

4.2.1 Caractérisation minéralogique globale

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

Le Tableau 4.2.1 résume l'importance relative des minéraux principaux présents dans les échantillons, le Tableau 4.2.2 donne les résultats des teneurs en carbonate.

	E-AVR-1	E-AVR-0	E-AVR-C	E-MBA-1	E-MBA-01	E-MBA-0	W-AVR-1	W-AVR-0	W-MBA-1	W-MBA-0
Quartz	++	++	++	++	++	+	++	++	++	+
Calcite	Non ou traces	Non ou traces	Non ou traces	+++	+++	+++	++	++	+++	+++
Dolomite	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-
Feldspaths	traces	traces	traces	-	-	-	traces	+	-	-
Minéraux argileux	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++
Oxydes de fer	-	-	-	-	-	-	-	-	traces	traces
Minéraux argileux										
Illite	+++	+++	+++	++	++	++	+++	+++	+++	++
Kaolinite	++	++	++	traces	traces	-	++	++	+	+
Smectite et Interstratifiés Illite-Smectites	+	+	+	++	++	++	+	+	++	++

Argiles fibreuses	-	-	-	-	-	traces	-	-	-	
Chlorite	-	-	-	-	-	-	traces	traces	traces	traces

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

Tableau 4.2.1 : Analyse minéralogique des sols étudiés

Echantillon	Teneur en carbonates (%)
E-AVR-0	12,6
E-AVR-1	20,0
E-AVR-C	10,6
E-MBA-0	64,4
E-MBA-01	31,2
E-MBA-1	27,1
W-AVR-0	16,3
W-AVR-1	16,0
W-MBA-0	58,8
W-MBA-1	25,1

Tableau 4.2.2 : Teneur en carbonates des sols étudiés, déterminée par calcimétrie par la méthode Dietrich – Frühling

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

- Les sols prélevés dans les deux carrières ont une composition minéralogique identique 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, et par une forte proportion de calcite, dans les Marnes bleues des 2 carrières ;
- On remarque pour les deux carrières que la teneur en carbonates des deux séries d'échantillons de Marnes bleues (supérieure et inférieure) est très différente, la partie inférieure est beaucoup plus carbonatée ;
- 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 13 à 20 % de carbonates et peuvent être qualifiées d'argiles calcareuses. Par contre, les Marnes bleues contiennent de 27 à 64 % de carbonates justifiant ainsi l'appellation de marne ;
- Les Argiles vertes supérieures et inférieures, présentent des diffractogrammes quasi-identiques. Les minéraux argileux les plus représentés sont l'illite et la kaolinite. On note également la présence, mais en plus faible quantité, de smectite et d'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 des traces ou une présence faible de kaolinite ;

- La chlorite est représentée sous forme de traces dans les Argiles vertes et les Marnes bleues de l'Ouest ; des traces d'argiles fibreuses ont été détectées dans les Marnes bleues inférieures de l'Est.

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

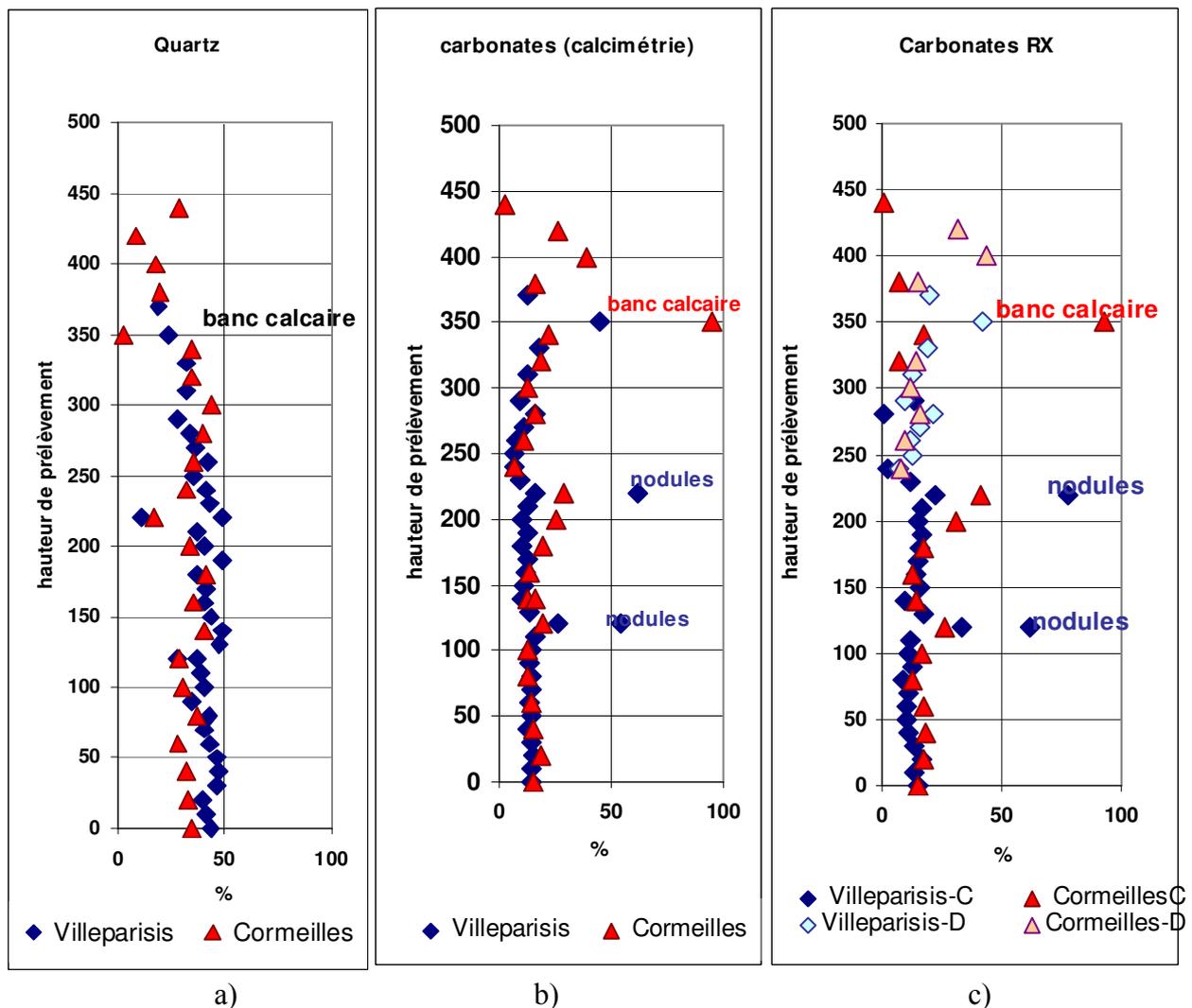


Figure 4.2.1 : Distribution du quartz (a) et des carbonates (dosés par calcimétrie (b) et par diffraction des RX (c) le long des profils de l'Argile verte de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis)

Les diagrammes de la Figure 4.2.1 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. Les quartz représentent 40 à 50 % des minéraux de 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 carbonate est inférieur à 25 % jusqu'à 3,40 m à l'exception des 3 niveaux mentionnés précédemment qui s'enrichissent 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 par de la calcite jusqu'à 2,30 m de hauteur et principalement par de la dolomite ensuite jusqu'à la partie supérieure de la formation à laquelle vient s'ajouter pour certains échantillons une petite part de calcite.

A ces minéraux non argileux 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 argiles représentent 45 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 dans la fraction argileuse est l'illite (15 à 30 %). 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/smectites 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 4.2.2).

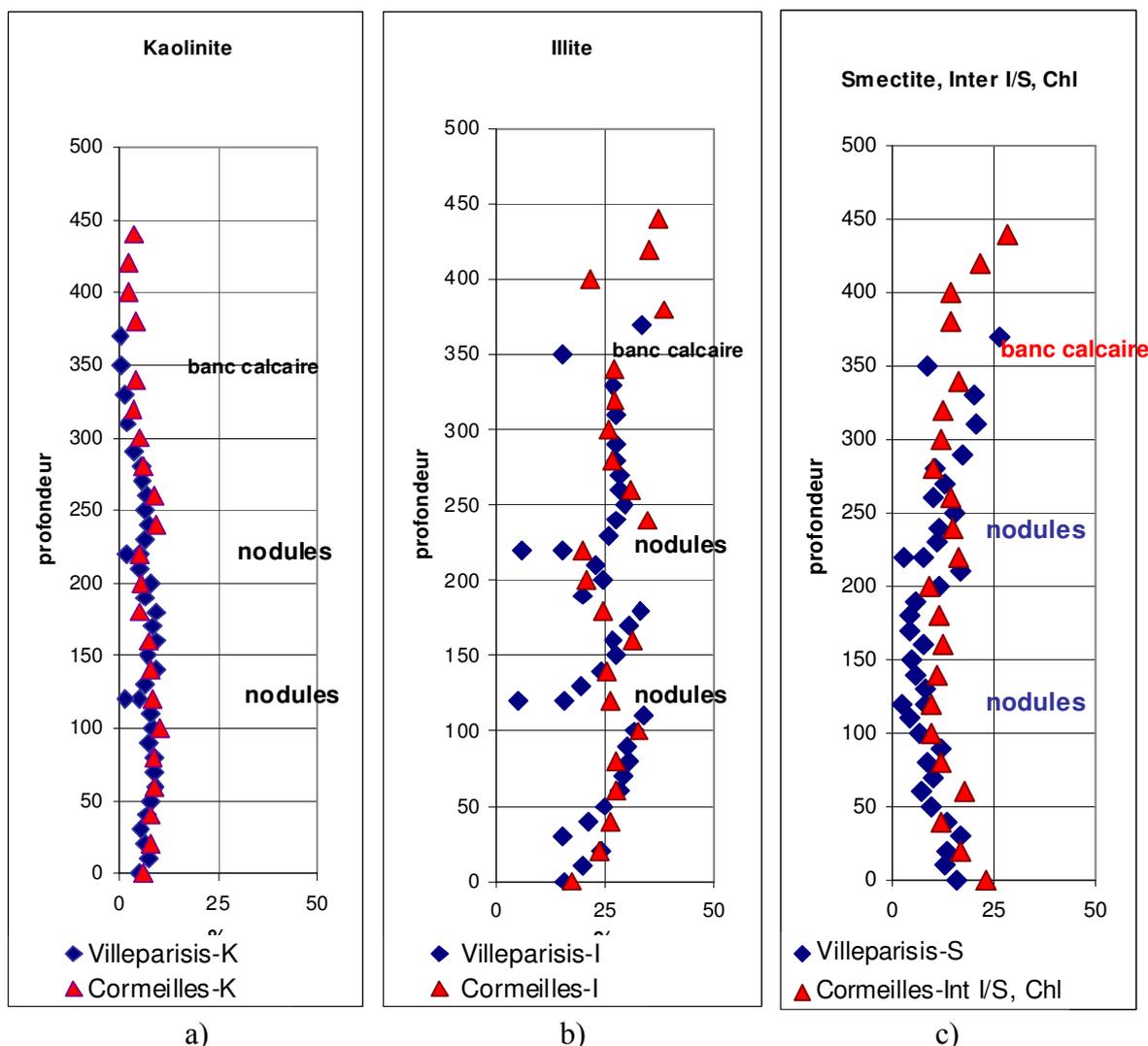


Figure 4.2.2: Distribution des minéraux argileux le long des profils de l'Argile verte de Romainville à l'Est (Villeparisis-Le Pin) et à l'Ouest (Cormeilles-en-Parisis), kaolinite (a), illite (b), smectites et interstratifiés (c)

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 identiques 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 feldspath 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, feldpaths, 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, smectite), accompagnée d'un enrichissement en magnésium (dolomite).

4.3 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE

4.3.1 Caractérisation géotechnique globale

Les essais de caractérisation géotechnique réalisés sur les échantillons des 2 carrières sont les suivants :

- Courbes granulométriques
- Teneur en eau naturelle W_n
- Limites d'Atterberg :
 - o Limite de liquidité (W_L), limite de plasticité (W_p), Indice de plasticité (I_p)
 - o Limite de retrait sur échantillon intact (W_{re}), et sur sol remanié (W_{rr}), indice de retrait ($I_R = W_L - W_{rr}$)
 - o Indice de consistance ($I_c = (W_L - W_n) / I_p$)
 - o Indice de Skempton ou activité de Skempton ($A = I_p / < 2 \mu m$)
- Poids volumique, porosité
- Valeur de bleu
- Surface spécifique

L'ensemble des résultats est regroupé dans le Tableau 4.3.1 Le diagramme de Casagrande est représenté sur la Figure 4.3.1 et les courbes granulométriques sur la Figure 4.3.2.

	<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_n (%)	30	25	32	37	26, 33	30
Limite de liquidité, W_L (%)	75	72	76	86	97	89
Limite de plasticité W_p (%)	40	38	40	44	40	42
Limite de retrait sur échantillon remanié W_{rr} (%)	16	16	17	29	19	21
Limite de retrait sur échantillon intact W_{re} (%)	16	16	17	33	22	30
Indice de plasticité, I_P (%)	35	34	36	42	57	47
Indice de retrait, I_R (%)	59	56	59	57	78	68
Indice de consistance, I_C	1,29	1,38	1,22	1,17	1,18	1,36
fraction fine <2 μ m (%)	78	80	80	89	81	78
Indice de Skempton	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	26,1	27,6	25,6
Poids volumique humide moyen γ_h ($kN.m^{-3}$)	19,4	20,0	20,2	18,5	19,9	18,9
Poids volumique sec moyen γ_d ($kN.m^{-3}$)	15,1	15,8	16,0	13,5	15,5	14,2
Porosité totale calculée n (%)	43	42	44	51	44	43
Teneur en carbonate (%)	12,6	20,0	10,6	64,4	31,2	27,1
Matières organiques (%)	0,12	0,23	0,10	0,46	2,84	3,07
Valeur de bleu (g/100g)	9,33	8,67	9,3	5,33	10,4	9,67
Surface spécifique calculée (m^2/g)	195	181	195	111	218	202

	<i>W-AVR-0</i>	<i>W-AVR-1</i>	<i>W-MBA-0</i>	<i>W-MBA-1</i>
Teneur en eau naturelle moyenne W_n (%)	34	30	27	37
Limite de liquidité W_L (%)	68	63	64	84
Limite de plasticité W_p (%)	33	31	28	43
Limite de retrait sur échantillon remanié W_{rr} (%)	19	18	20	20
Limite de retrait sur échantillon intact W_{re} (%)	21	22		
Indice de plasticité I_P (%)	35	32	36	41
Indice de retrait I_R (%)	49	45	44	64
Indice de consistance I_C	0,97	1,03	1,03	1,15
fraction fine <2 μ m (%)	90	84	91,5	77,5

Indice de Skempton	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_a ($kN.m^{-3}$)	14,8	14,8	15,4	
Porosité totale calculée moyenne n (%)	46	47	43	
Teneur en carbonate (%)	16,3	16,0	58,8	25,1
Matières organiques (%)	0,59	0,50	1,10	2,72
Valeur de bleu (g/100g)	7,3	6,7	5,3	10,5
Surface spécifique calculée (m^2/g)	153	140	111	220

Tableau 4.3.1 : Caractéristiques géotechniques des Argiles vertes de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est et de l'Ouest (E : Villeparisis-Le Pin, W : Cormeilles-en-Parisis)

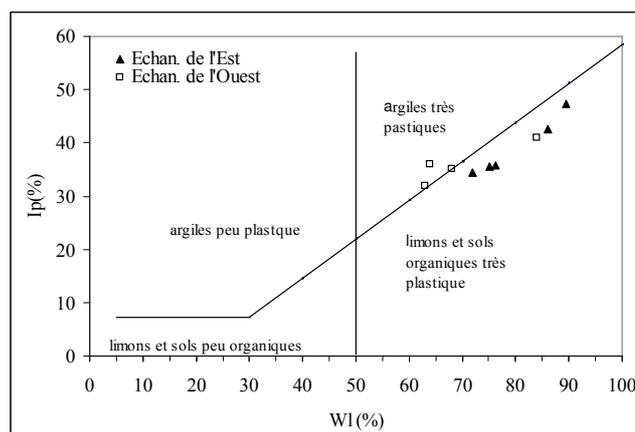
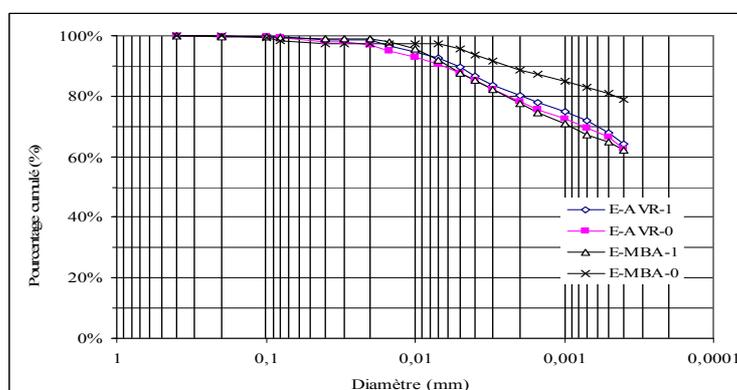
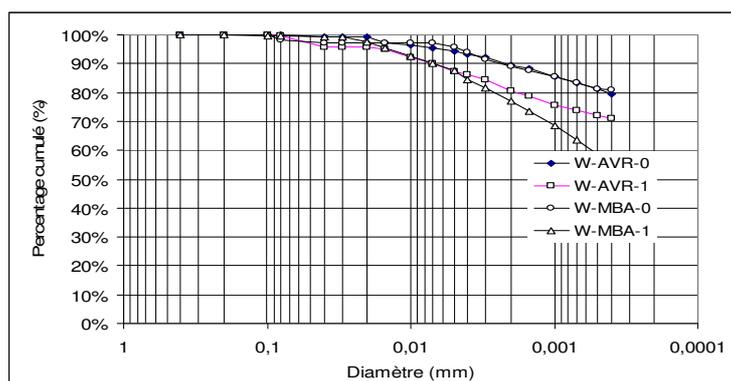


Figure 4.3.1 : Limite de liquidité et indice de plasticité des sols étudiés reportés sur le diagramme de plasticité de Casagrande



a)



b)

Figure 4.3.2 : Courbes granulométriques des échantillons étudiés a) E : Villeparisis-Le Pin, b) W : Cormeilles-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 fine ($78\% < 2\mu\text{m}$). Dans le diagramme de plasticité de Casagrande, tous les sols étudiés se placent sur ou juste au-dessous de la ligne A (Figure 4.3.1), 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 ;
- 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 37 %). 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 retrait-gonflement potentiellement importante ;
- Les poids volumiques sec et humide sont faibles et varient peu ;
- La porosité des 2 formations est élevée (comprise entre 40 et 48 %) ;
- Les valeurs de bleu et les surfaces spécifiques calculées 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) ;
- 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, en ramenant le taux de carbonates à la même valeur, les résultats sont quasi identiques ;

- Les deux séries d'échantillons de Marnes bleues prélevées dans les deux carrières se différencient par leur teneur en carbonates et leur teneur en matière organique (la partie supérieure est « faiblement organique » (XP P 94-011)).
- Les Marnes bleues présentent des indices de plasticité I_p et de retrait $I_R = W_L - W_{TR}$ 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).

En parallèle à ces essais classiques d'identification, une étude expérimentale a été menée sur l'essai au bleu ainsi que sur les mesures de surface spécifique et de capacité d'échange cationique qui peuvent être tirées de l'essai au bleu ou obtenues par d'autres méthodes. Cette étude a fait l'objet de publications (cf. Publications Armines – Centre de Géosciences : Articles 3, 5, 7, volume II : annexes 2) ;

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 $< 2\mu\text{m}$ et indice de Skempton) des sols étudiés sont données dans le Tableau 4.3.2.

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.

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

Tableau 4.3.2 : Corrélations entre valeur de bleu et paramètres géotechniques

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 0,93 ;
- Des coefficients de corrélations supérieurs à 0,9 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 ($< 2\mu\text{m}$) d'autre part, ont été calculées (Tableau 4.3.3).

Echantillons	r^2						
	WL	Wp	Ip (%)	Ir (%)	Wrr	Wre	$< 2\mu\text{m}$ (%)
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

Tableau 4.3.3 : Corrélations entre teneur en carbonates et paramètres géotechniques

- 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_{rr}) 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 ($> 0,93$).

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 l'Est : W_r compris entre 15 et 17 %).

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 entre 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 4.3.3).

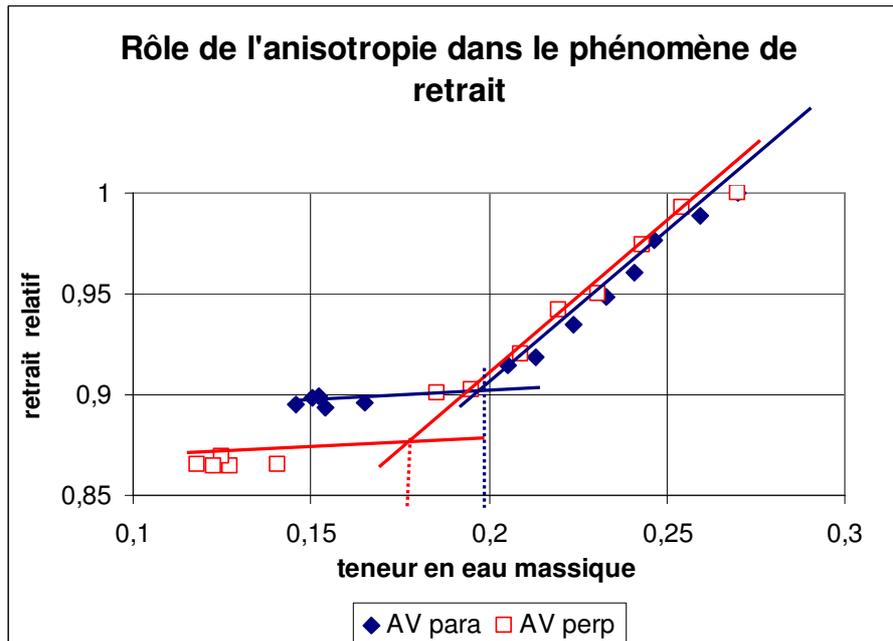
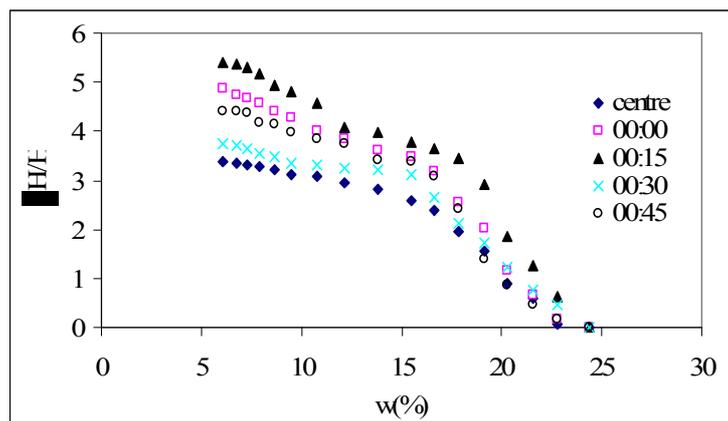
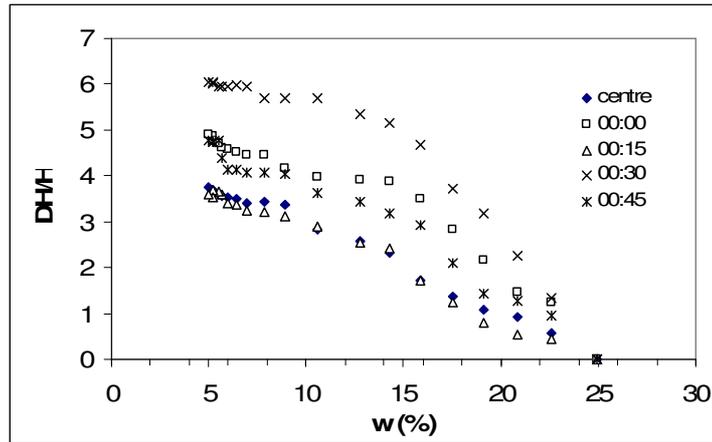


Figure 4.3.3 : Déformation latérale en fonction de la teneur en eau déterminée à partir du traitement d'images d'échantillons E-AVR-0 observés perpendiculairement et parallèlement au litage

Cependant, 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 4.3.4)



a)



b)

Figure 4.3.4 : 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

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

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 4.3.5 et placés dans la charte du potentiel de gonflement des sols établie par Daksanamurthy et al. à partir du diagramme de Casagrande (Figure 4.3.5)

L'analyse des caractéristiques géotechniques confirme la continuité de faciès entre l'Est et l'Ouest du bassin 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).

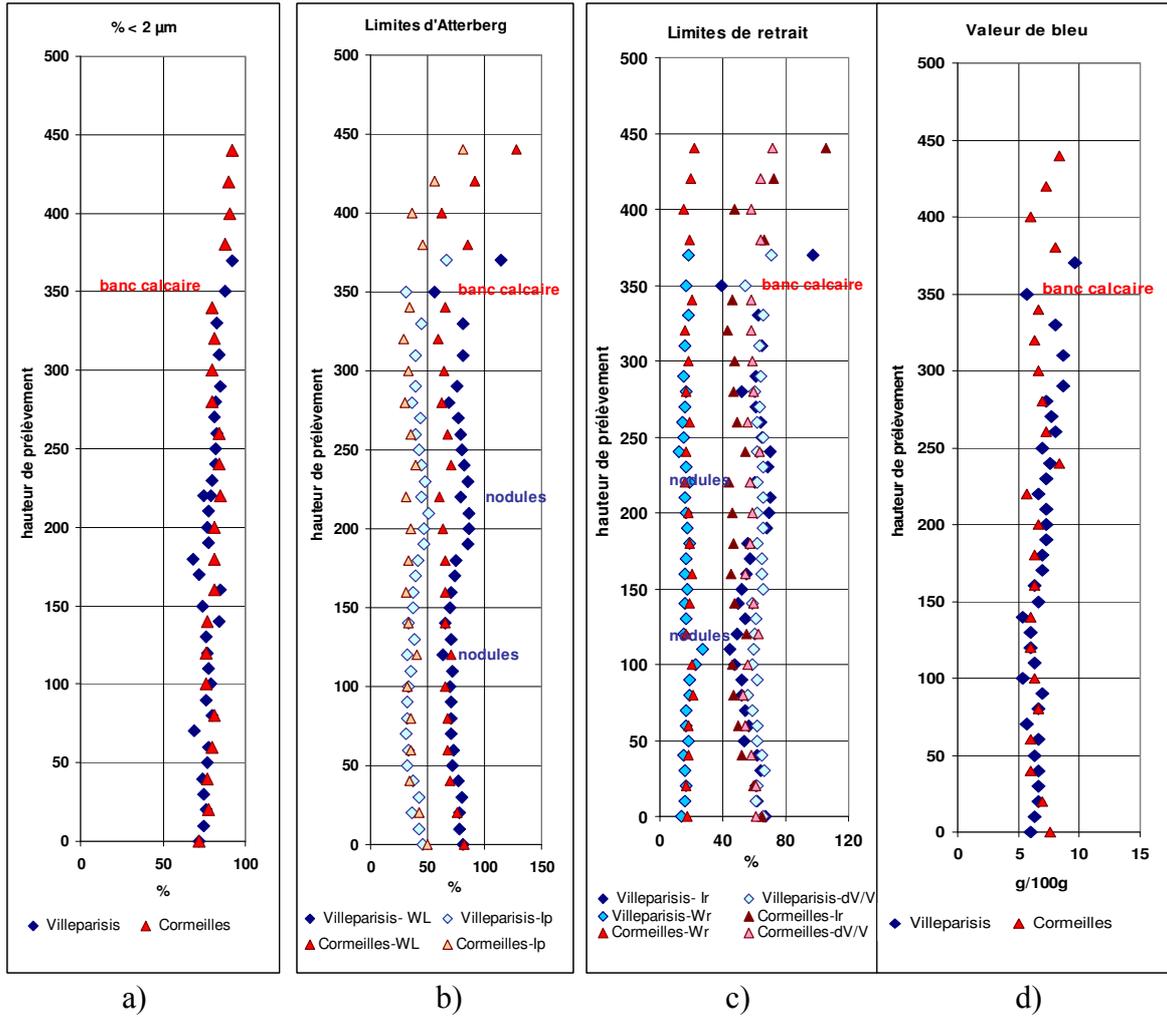


Figure 4.3.5 : Caractérisations géotechniques des profils des Argiles vertes de Romainville de l'Est (Villeparisis-Le Pin) et de l'Ouest (Cormeilles-en-Paris), % < 2 % : (a), limites d'Atterberg (WL, Wp, Ip) : (b), limites de retrait (Wr, Ir, dV/V) : (c), valeur de bleu (d)

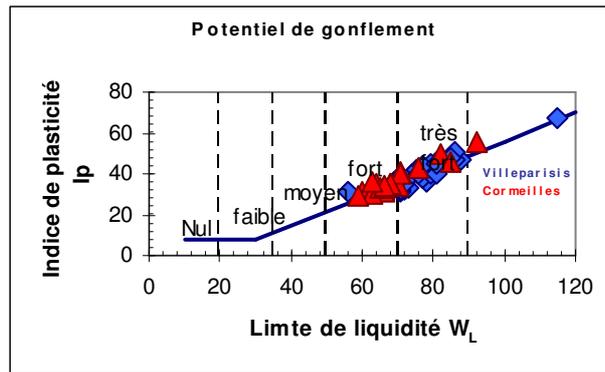


Figure 4.3.6 : Position des échantillons des profils provenant des 2 sites dans la charte du potentiel de gonflement des sols établie par Daksanamurthy et al. à partir du diagramme de Casagrande

- 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 et les plus fortes entre 2 et 2,50 m), augmentent de façon significative à l'Ouest, au sommet de la formation plus épaisse de quelques décimètres ;
- 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 $2 \mu\text{m}$ 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 4.3.6).

4.4 FISSURATION

La fissuration de l'Argile verte de Romainville et de la Marne bleue d'Argenteuil, au cours des cycles séchage-humidification, a été étudiée sur des échantillons intacts et remaniés.

4.4.1 Echantillons intacts

Les résultats obtenus sur les échantillons intacts mettent en évidence de faibles variations de volume et l'absence de fissuration de la Marne bleue d'Argenteuil 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 4.4.1).

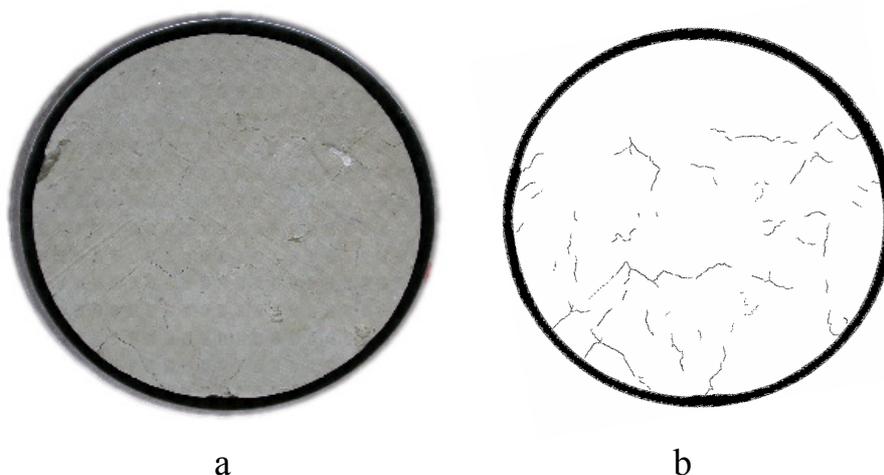


Figure 4.4.1 : Echantillon intact de Marne bleue d'Argenteuil : a) après séchage, b) après imbibition ($w > w_r$)

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. Publications Armines – Centre de Géosciences : Articles 2, 8, volume II : annexes 2).

Pour l'Argile verte de Romainville, une fissuration diffuse apparaît dès le premier séchage ; elle évolue très lentement au cours des cycles successifs tant que la teneur en eau d'hydratation reste inférieure à la limite de retrait. 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 4.4.2), la destruction totale de l'échantillon étant empêchée par l'anneau métallique de sertissage.

L'observation de ces fissures met en évidence la présence d'anciennes surfaces de micro-cisaillement ou « slickensides » provenant de remaniement au cours des temps géologiques. Elles se sont en partie cicatrisées mais constituent des plans de faiblesse qui jouent lors de sollicitations hydriques ou mécaniques.



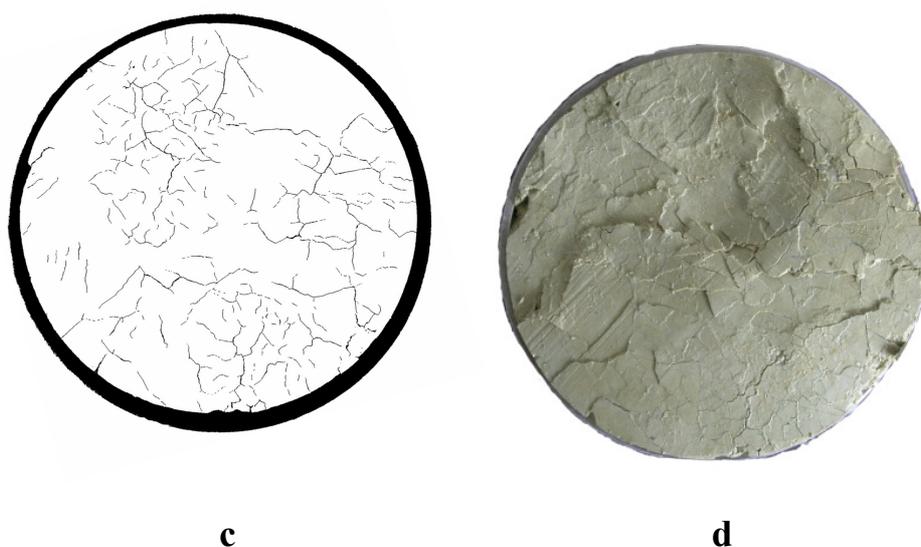


Figure 4.4.2 : Argile verte de Romainville : a) après le 1er séchage, b) traces des fissures de a), c) évolution des fissures après 3 cycles séchage-humidification, d) ouvertures des fissures au cours de l'imbibition ($w > w_r$).

4.4.2 Echantillons remaniés

Des essais de séchage et d'imbibition sur échantillons remaniés ont été réalisés. Les conditions initiales (dimensions, formes des échantillons ainsi que la nature de la surface de base (lisse ou rugueuse) sont données dans le Tableau 4.4.1; les photos correspondantes sont présentées en annexe (cf. paragraphes 4.10.1 et 4.10.2).

L'analyse du tableau met en évidence que le seul échantillon d'Argiles vertes de Romainville remaniée qui présente des signes de fissuration a été mis en place sur une surface rugueuse. Sa hauteur initiale est de 20 mm (cf. paragraphe 4.10.1). 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.

	<i>LXW (ou D) (mm)</i>	<i>épaisseur</i>					
		<i>30mm</i>	<i>24mm</i>	<i>20mm</i>	<i>15mm</i>	<i>10mm</i>	<i>5mm</i>
E-AVR-1	<i>173 X 113</i>					non	
	<i>114 X 84</i>				non	non	non
	<i>84 X 54</i>					non	
	<i>D=70</i>		non				
	<i>D=88</i>						non
	<i>D=185</i>			non	non	non	
	<i>D=185 (base rugueuse)</i>	non		<i>oui</i>			
E-MBA-1	<i>173 X 113</i>					<i>oui</i>	
	<i>114 X 84</i>				non	non	<i>oui</i>
	<i>84 X 54</i>					non	
	<i>D=70</i>		non				
	<i>D=88</i>						<i>oui</i>
	<i>D=185</i>			non	non	<i>oui</i>	
	<i>D=185 (base rugueuse)</i>			<i>oui</i>			

Tableau 4.4.1 : Caractéristiques géométriques des éprouvettes de matériau remanié

La comparaison des essais réalisés sur l'Argile verte de Romainville met en évidence l'importance de la hauteur de matériau mise en jeu au cours du séchage mais aussi 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 de la Marne bleue d'Argenteuil est différent. La plupart des échantillons sur surface lisse dont la hauteur est inférieure à 10 mm se fissure (cf. paragraphe 4.10.2), il en est de même de l'échantillon de 20 mm sur une surface rugueuse. Contrairement à l'Argile verte de Romainville, cette fissuration se répartit sur toute la surface en formant des polyèdres plus ou moins réguliers (cf. paragraphe 4.10.1).

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 20 % pour AVR-0 à plus de 30 % pour MBA-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 centaines de microns va jouer 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.

Au cours de l'imbibition, le comportement de ces 2 formations est aussi très différent. Pour la Marne bleue le gonflement accompagnant l'imbibition entraîne une cicatrization des faces des polyèdres de rétraction permettant à l'éprouvette de retrouver ainsi un état proche de l'état initial (cf. paragraphe 4.10.2). 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 (cf. paragraphe 4.10.2).

4.4.3 Conclusions

Les deux formations étudiées ne présentent pas le même comportement vis à vis de la fissuration au cours des cycles drainage-imbibition (cf. Publications Armines – Centre de Géosciences : Article 8, volume II : annexes 2).

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 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 est remaniée, ce squelette est détruit, les grains de carbonates jouent alors un rôle résistant ponctuellement, en créant des forces de frottement au contact du support qui s'opposent localement aux forces de rétraction et permettent ainsi la fissuration.

Cependant quelle que soit la formation, 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 donc un rôle primordial dans la fissuration des matériaux remaniés.

4.5 CARACTERISTIQUES HYDRIQUES

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

- succion en fonction de la teneur en eau (ou courbes de rétention) ;
- succion en fonction du degré de saturation ;
- succion en fonction de l'indice des vides ;
- teneur en eau en fonction de l'indice des vides.

Les courbes de succion – teneur en eau renseignent sur l'importance des transferts hydriques dans les matériaux en fonction des paliers de succion imposés et permettent donc de définir la succion correspondant à une valeur de teneur en eau donnée (cf. Publications Armines – Centre de Géosciences : Articles 2, 6, 8 volume II : annexes 2).

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. 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 300 MPa. Chaque courbe succion – teneur en eau est le résultat d'un drainage (paliers de succion croissants) ou d'une humidification (paliers décroissants).

Trois paliers de succion ont été imposés par la méthode osmotique, à savoir : 1, 2 et 4 MPa. 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.

La méthode des solutions salines saturées a été employée pour imposer des paliers de succion jusqu'à 300 MPa. Les échantillons sont placés dans des dessiccateurs en verre contenant à leur base différentes solutions salines. Ces dessiccateurs, hermétiquement clos, sont plongés dans un bain thermostaté à 25°C. 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.

Différentes solutions salines saturées sont utilisées, elles sont présentées dans le Tableau 4.5.1.

Solutions	Humidité relative (%) à 25°C	Succion (MPa) à 25°C
CuSO ₄ .5H ₂ O	98	2,8
K ₂ Cr ₂ O ₇	98	2,8
BaCl ₂ .2H ₂ O	90	14,7
(NH ₄) ₂ SO ₄	81	29,5
NaNO ₂	65	60,4
K ₂ CO ₃	43	118,2
CaCl ₂ .6H ₂ O	29	173,5
LiCl	12	297,7

Tableau 4.5.1 : Solutions salines saturées utilisées

Parallèlement aux mesures de teneur en eau en fonction de la succion imposée, nous avons effectué, pour certains paliers de succion par phase vapeur, 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 5mm³ pour un échantillon de 10 cm³ (Daupley, 1997).

Le chemin complet séchage – humidification employé est le suivant (succion en MPa) :

2,8 → 14,8 → 29,5 → 60,4 → 118,2 → 173,5 → 297,7 → 118,2 → 29,5 → 2,8

L'ensemble des courbes de drainage des échantillons d'Argile verte inférieure de l'Est (E-AVR-0) étudiés ainsi qu'un exemple de courbe de drainage-imbibition d'un des échantillons sont présentées sur la Figure 4.5.1. Sur la Figure 4.5.2 sont reportées les courbes de drainage-imbibition de la Marne bleue supérieure de l'Est (E-MBA-1)

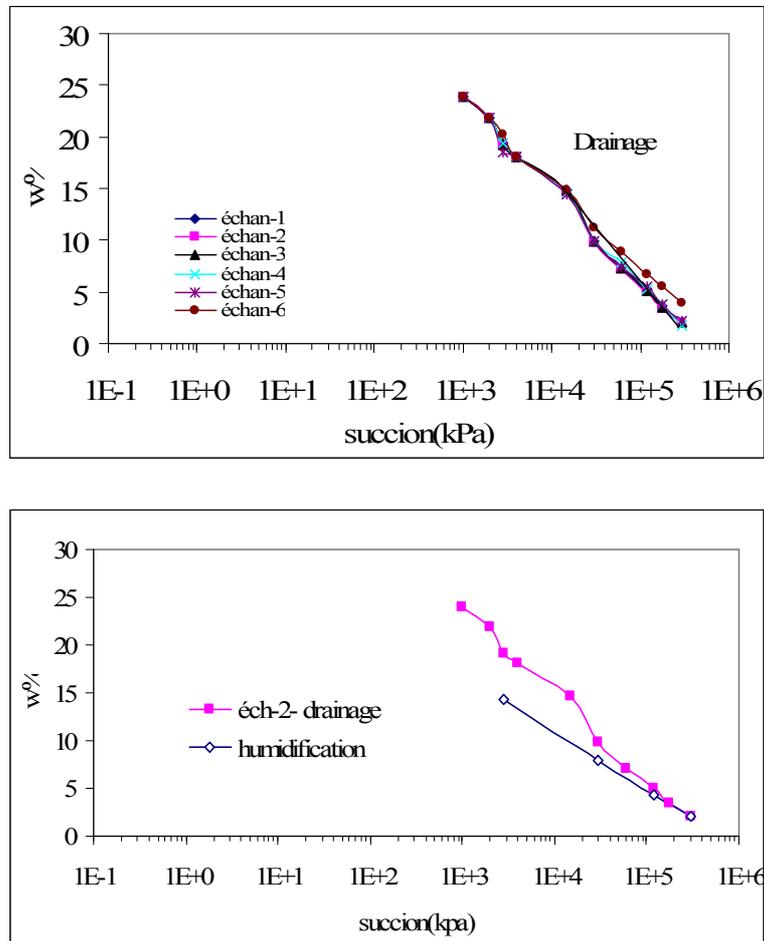


Figure 4.5.1 : Courbes de rétention de l'Argile verte de Romainville prélevée à l'Est de Paris (E-AVR-0), carrière de Villeparisis-Le Pin

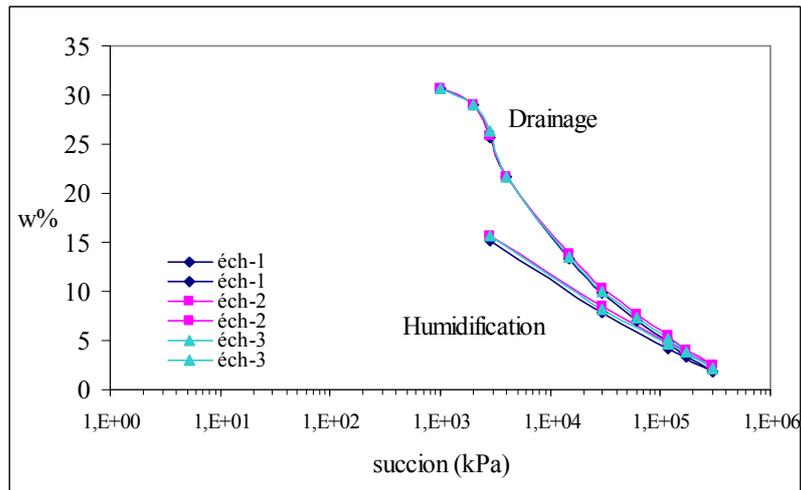


Figure 4.5.2 : Courbes de rétention de la Marne bleue d'Argenteuil de l'Est de Paris (E-MBA-1), carrière de Villeparisis-Le Pin

Les échantillons d'Argile vertes et de Marnes bleues ont suivi un cycle séchage-humidification. Ils sont partis de l'état naturel (AVR : $s = 800$ kPa, $w = 24 - 25$ %, MBA : $s = 1200$ kPa, $w = 30$ %) et ont subi un séchage progressif en suivant le chemin complet donné ci-dessus. On remarque sur le premier graphe concernant AVR (Figure 4.5.1) et sur le graphe concernant MBA (Figure 4.5.2) que :

- pour chaque formation, les courbes des différents échantillons sont confondues, montrant une certaine homogénéité du matériau et une répétitivité des résultats ;
- une quasi réversibilité entre le drainage et l'humidification pour les succions > 100 MPa ; en dessous de cette valeur les chemins de drainage et d'imbibition se séparent présentant ainsi un phénomène d'hystérésis ;
- la zone de raccordement entre les points obtenus par la méthode osmotique et la méthode des pressions de vapeur saturante présente un fléchissement de la courbe dans le cas de AVR, qui peut être interprété comme un artefact.

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 4.5.3 (AVR) et sur la Figure 4.5.4 (MBA) pour les paliers de succion où une mesure du volume de l'échantillon a été réalisée.

Sur le graphe de la Figure 4.5.3, indice des vides en fonction de la succion ($e - s$) concernant AVR, on observe une variation importante d'indice des vides pour les succions inférieures à 15 MPa environ. Puis lorsque la succion atteint des valeurs supérieures, cette variation est moins importante et tend à s'annuler. Si on met en parallèle le graphe indice des vides en fonction de la teneur en eau ($e - w$ %), on note des variations identiques à celles du graphe précédent, avec un palier qui traduit une stabilisation du volume à partir d'une teneur en eau de 15 %. 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. Le domaine de saturation

du sol est représenté par une droite, 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.

Une comparaison entre ces courbes de retrait et les courbes de retrait obtenues de façon classique, par mesure de volume lors du séchage d'échantillons à l'air libre est donnée en Figure 4.5.5. On note des valeurs de la limite de retrait très voisines, avec un indice des vides légèrement plus faible dans le cas des solutions salines.

Les deux graphes du milieu de la Figure 4.5.3 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, par ailleurs, très mal défini sur les courbes teneur en eau – succion ou indice des vides – succion. Les Argiles vertes de Romainville prélevées dans la carrière de l'Est montrent un point d'entrée d'air vers 15 MPa pour une teneur en eau de 14 à 16 % confondu avec la limite de retrait.

Les résultats obtenus sur MBA (Figure 4.5.4) mettent en évidence une différence importante entre les valeurs du point d'entrée d'air ($s = 0,3$ MPa, $w = 35$ %) et la limite de retrait ($s = 12$ MPa, $w = 14$ %). La désaturation de MBA 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 entre AVR et MBA dénote une différence de comportement. Alors que AVR présente un comportement de sol plastique, MBA intacte présente celui d'un sol raide, voire de roche tendre. Ce comportement peut être attribué au squelette semi-rigide constitué par les carbonates.

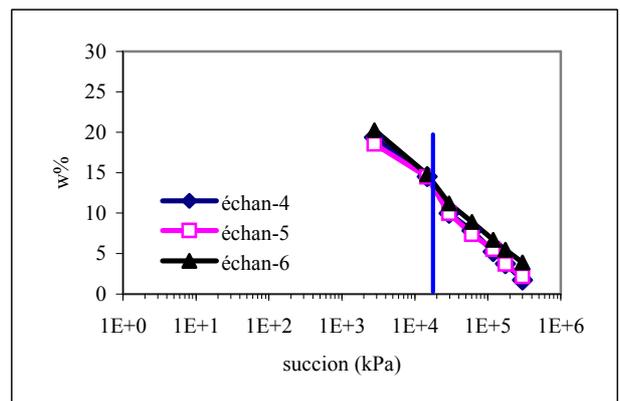
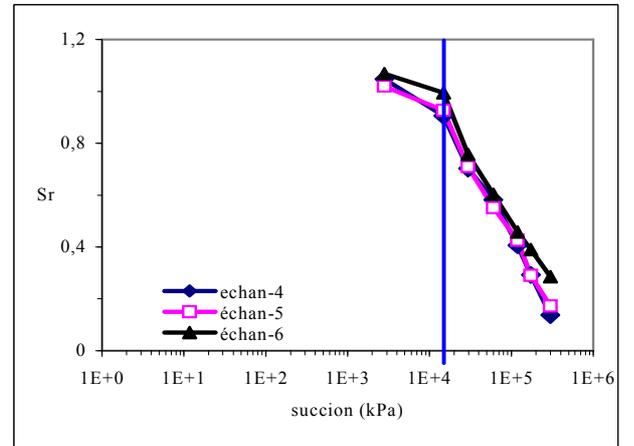
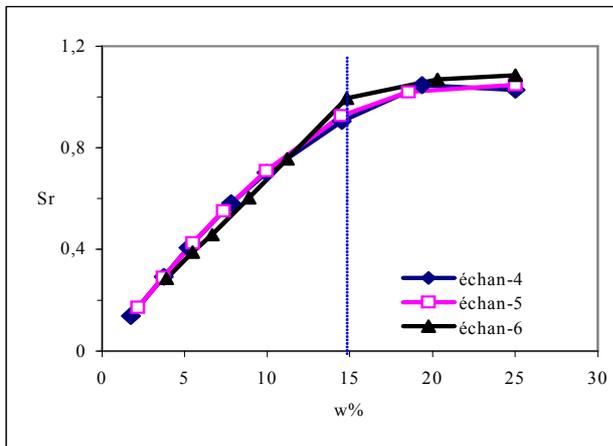
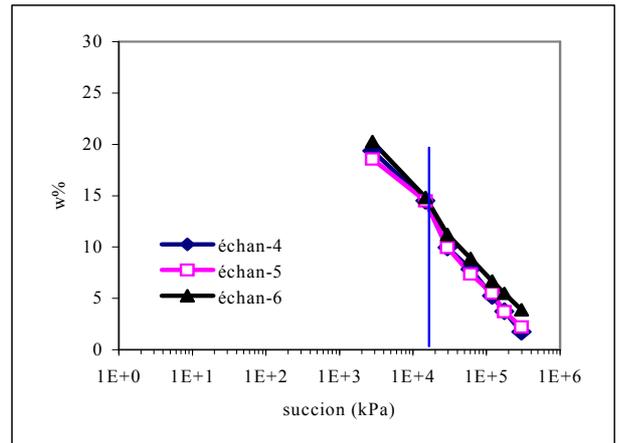
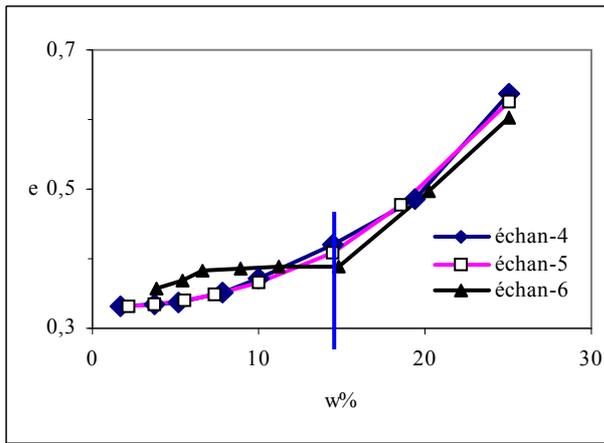


Figure 4.5.3 : Comportement global des Argiles vertes de Romainville de l'Est au cours du premier drainage

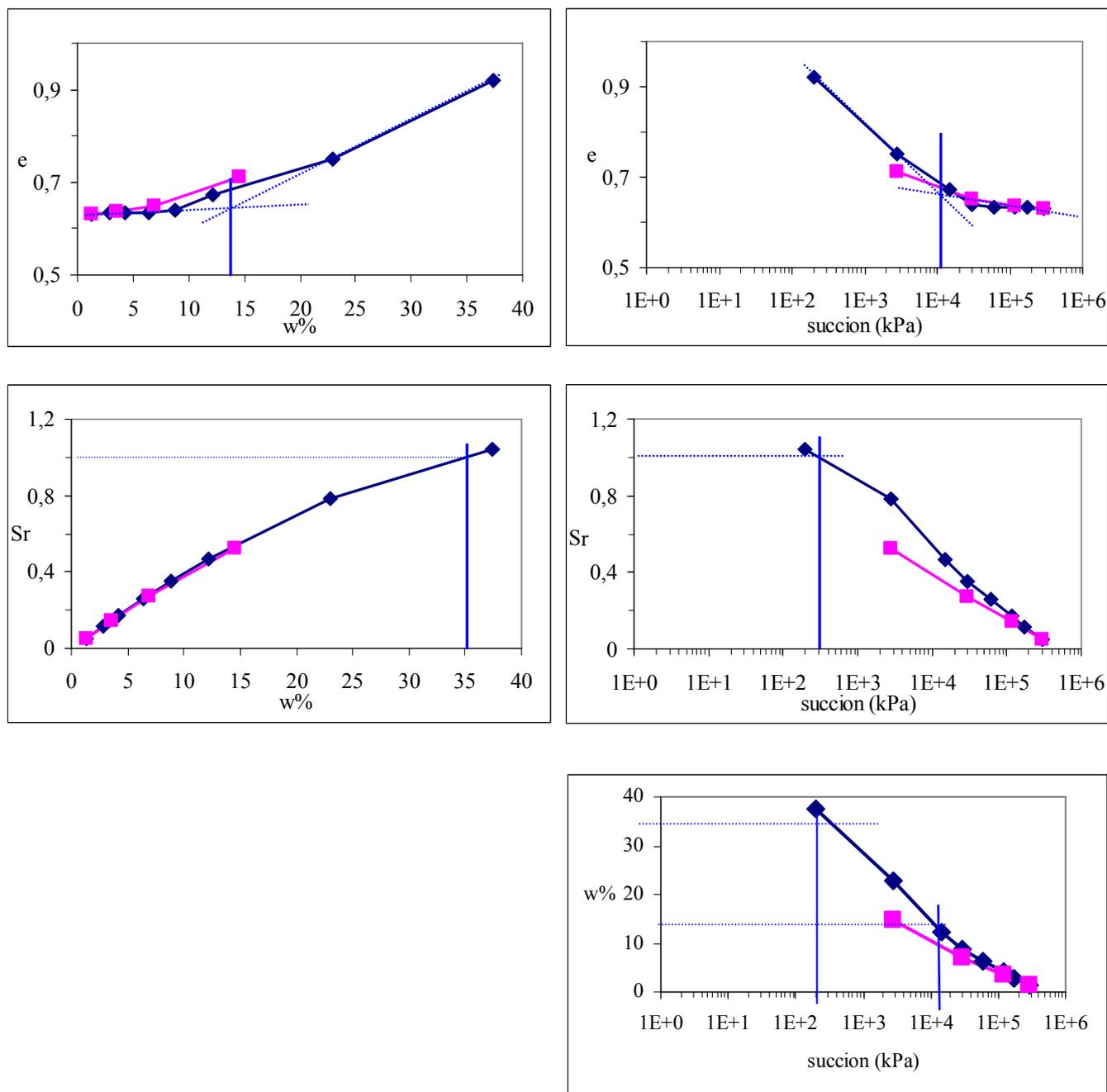


Figure 4.5.4 : Comportement global des Marnes bleues d'Argenteuil de l'Est au cours d'un cycle séchage -humidification

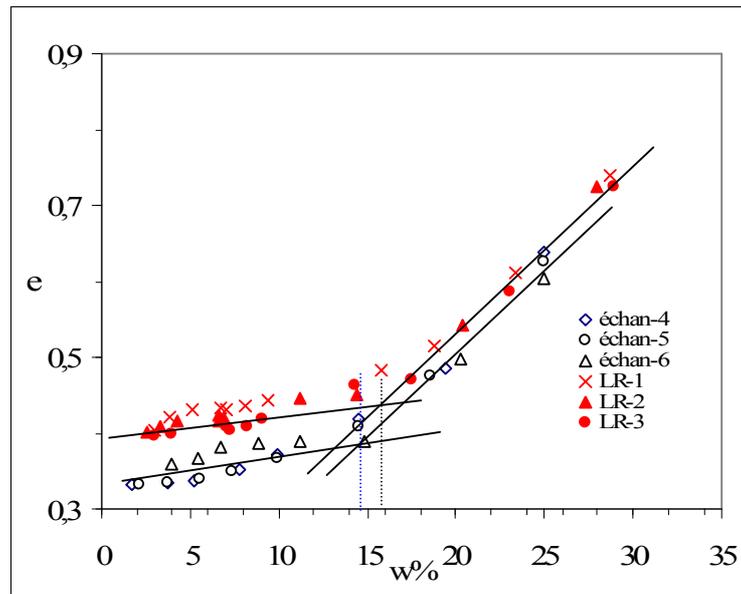


Figure 4.5.5: Comparaison entre la limite de retrait déterminée par mesure de volume lors du séchage à l'air libre et par imposition des paliers de succion (LR : limite de retrait à l'air, échan-x : limite de retrait par succion)

4.6 CARACTERISTIQUES MICROSTRUCTURALES

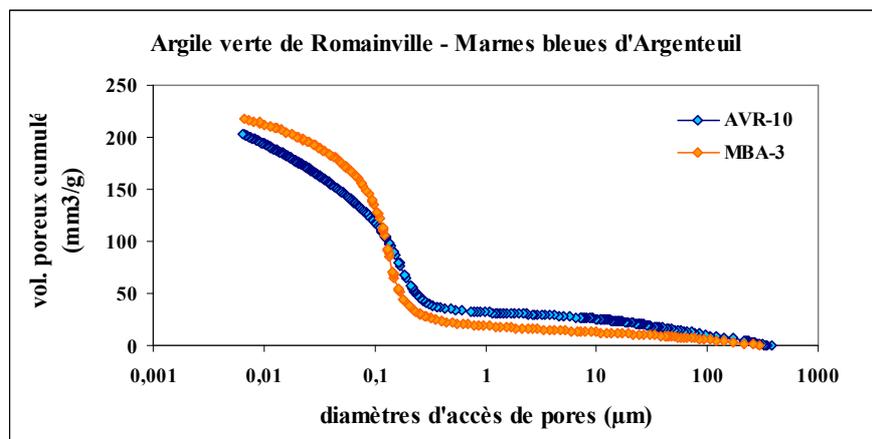
L'étude microstructurale de AVR et de MBA est réalisée par porosimétrie au mercure et observation au microscope électronique à balayage (MEB)

4.6.1 Matériaux à l'état naturel lyophilisés

La Figure 4.6.1 représente les courbes cumulées et les courbes dérivées d'échantillons de AVR et de MBA naturels lyophilisés.

La distribution des diamètres d'accès de pores est unimodale et présente une queue de distribution vers les faibles diamètres pour les 2 formations. La distribution des pores est centrée vers 0,15 μm pour MBA et vers 0,20 μm pour AVR, elle est plus étalée pour AVR que pour MBA. Ces courbes sont caractéristiques d'une texture matricielle argileuse.

Les images prises au MEB (Figure 4.6.2) de ces 2 matériaux mettent en évidence un arrangement des minéraux suivant le plan de litage (a, c) et une anisotropie marquée (a, b). MBA est constitué de particules plus fines que AVR, ceci est confirmé par la valeur des pourcentages de particules inférieures à 2 μm .



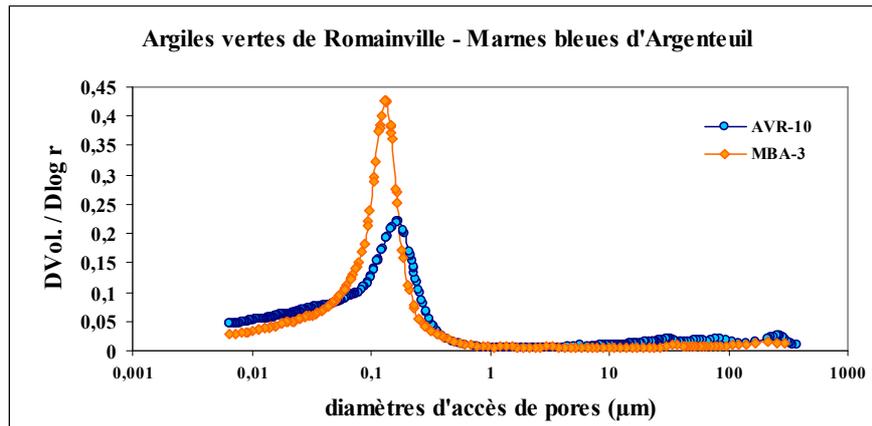


Figure 4.6.1 : Courbes cumulées et dérivées de AVR et MBA lyophilisées

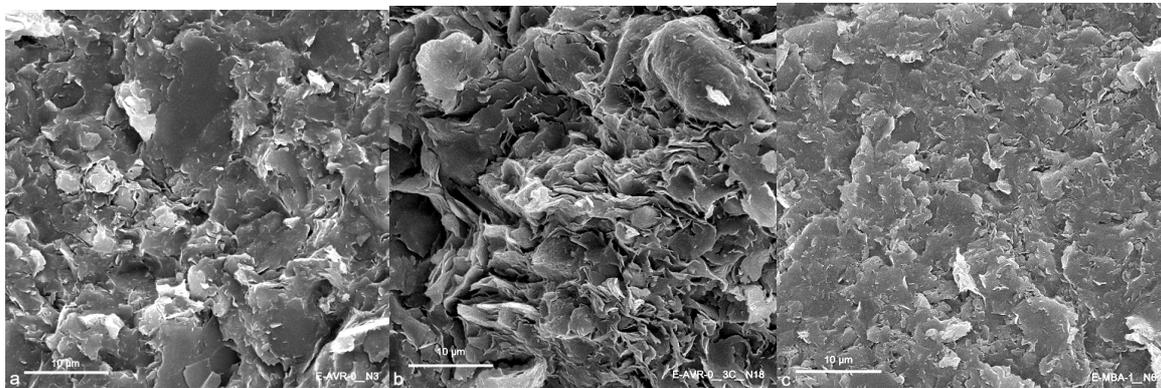


Figure 4.6.2: Images au MEB : a) Argile verte de Romainville : plan parallèle au litage, b) Argile verte de Romainville : plan perpendiculaire au litage, c) Marne bleue d'Argenteuil : plan parallèle au litage

4.6.2 Argiles vertes de Romainville intacte et sous forme de colluvions argileuses

La comparaison des courbes porosimétriques d'échantillons lyophilisés d'AVR intact et sous forme de colluvions met en évidence une déstructuration des colluvions argileuses due au remaniement par les cycles climatiques successifs séchage–humidification qui favorise l'apparition de particules argileuses dispersées ou sous forme d'amas de quelques particules (famille de diamètres des pores principale centrée vers 20 nm) (Figure 4.6.3).

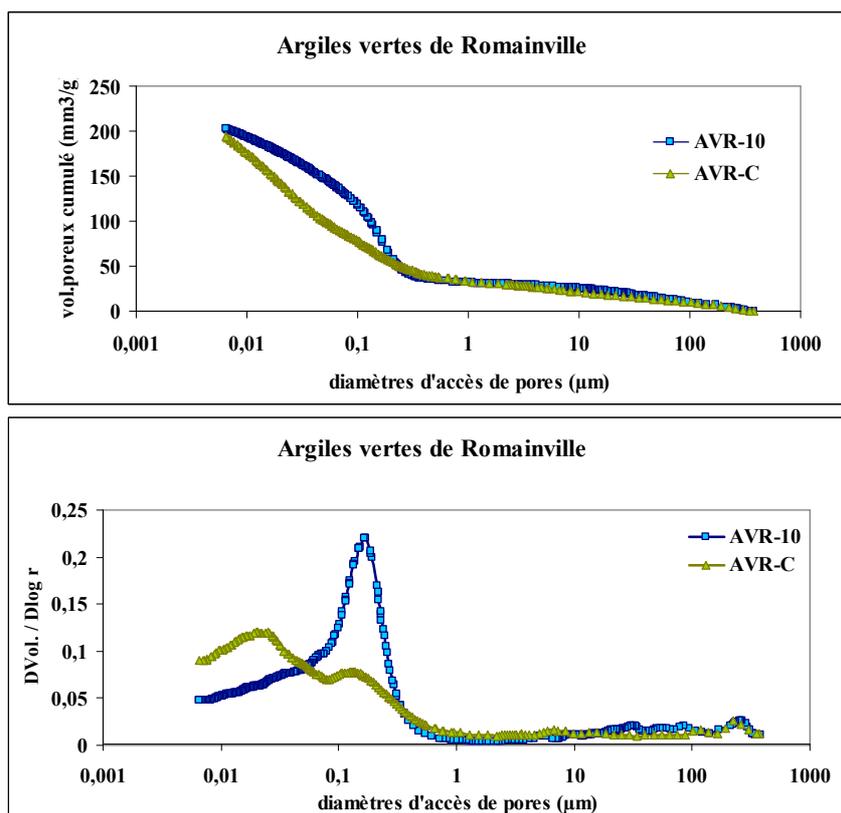


Figure 4.6.3 : Courbes cumulées et dérivées de distribution des diamètres de pores de l'Argile verte de Romainville à l'état naturel (AVR-10) et à l'état de colluvion (AVR-C)

4.6.3 Comparaison du comportement microstructural de AVR et de MBA à l'état naturel et à l'état remanié au laboratoire, lors de la réhumectation

La Figure 4.6.4 présente les courbes porosimétriques de AVR et de MBA après lyophilisation à l'état naturel, après gonflement, 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.

L'analyse de ces courbes met en évidence pour AVR une augmentation de la taille et du volume poreux 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 %).

Le gonflement n'a pas affecté la taille des pores et très peu affecté le volume poreux (5 %) de MBA intact alors que MBA remanié enregistre une forte augmentation de la porosité en taille et en volume (78 %) (Tableau 4.6.1).

Ces résultats confirment les différences constatées entre les courbes de transferts hydriques d'AVR et de MBA concernant le point d'entrée d'air et la limite de retrait.

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.

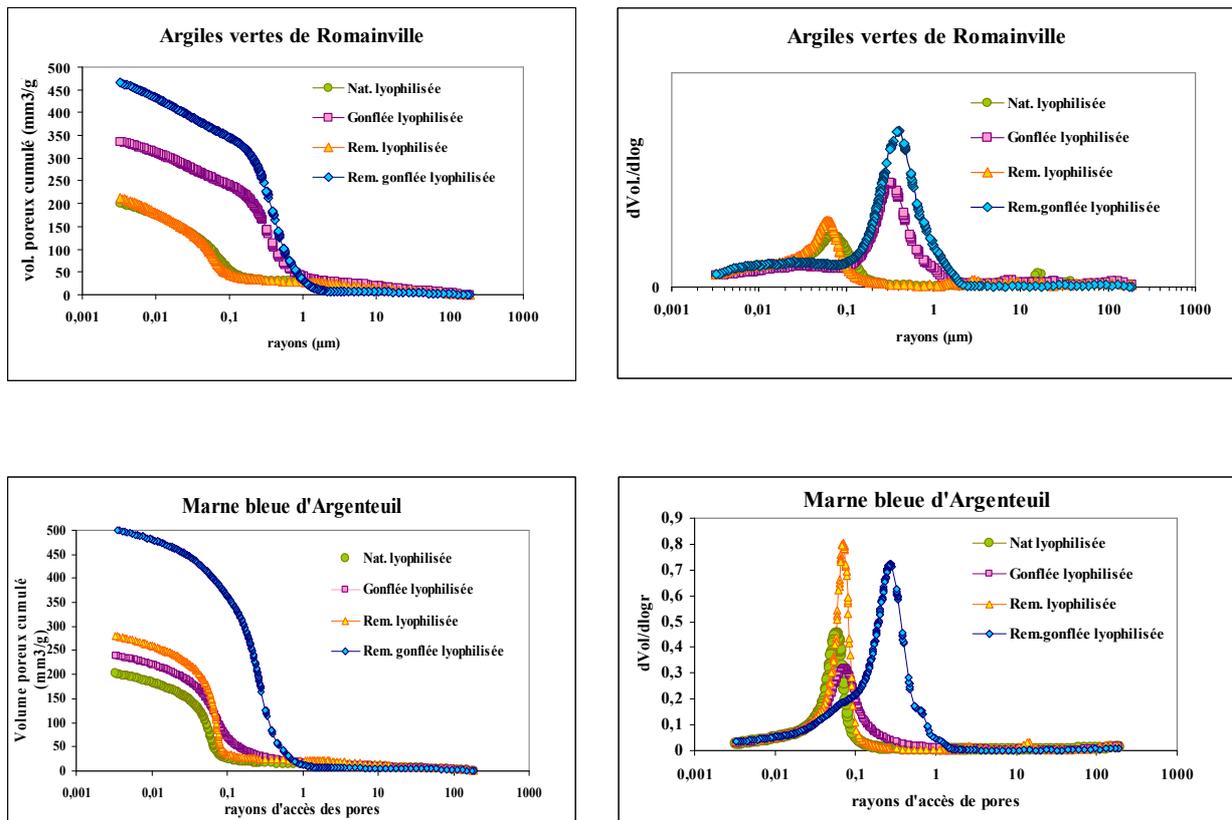


Figure 4.6.4 : Courbes porosimétriques cumulées et dérivées d'AVR et de MBA

	Teneur en eau (w %)	Volume poreux ($\text{mm}^3 \text{g}^{-1}$)	Rayons moyens (μm)	% de gonflement
AVR intacte naturelle	25	201	0.070	
AVR intacte gonflée	43	336	0.322	67
AVR remaniée (w% naturelle)	27	213	0.062	
AVR remaniée gonflée	51	465	0,413	118
MBA intacte naturelle	23	227	0.059	
MBA intacte gonflée	25	239	0.074	5
MBA remaniée (w% naturelle)	24	281	0.070	
MBA remaniée gonflée	56	501	0.272	78

Tableau 4.6.1 : Caractéristiques des courbes porosimétriques de AVR et de MBA intacts et remaniés, à la teneur en eau d'origine et après gonflement

Ces analyses microstructurales complétées par des analyses sur des cycles séchage-humidification ont fait l'objet de plusieurs articles (cf. Publications Armines – Centre de Géosciences : Articles 2, 6, 8, 9, volume II : annexes 2).

4.7 COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX ETUDIES

4.7.1 Protocoles d'essai

Des essais sont menés dans des moules œdométriques conventionnels et dans un moule cylindrique de type œdométrique en plexiglas avec un piston en plexiglas (Figure 4.7.1) selon la procédure ASTM, 1997.

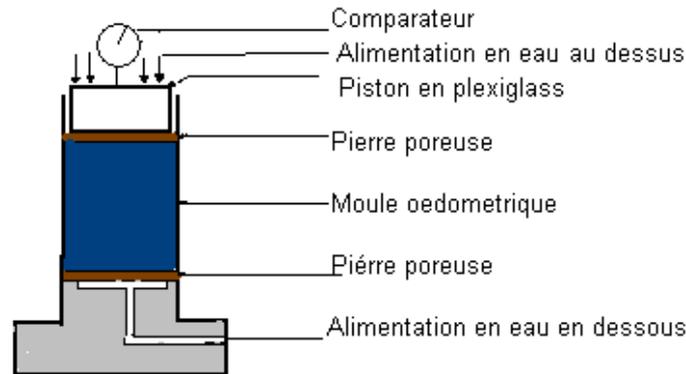


Figure 4.7.1 : Moule de type œdométrique : deux modes d'alimentation (haut et bas, Parcevaux, 1980)

Les échantillons cylindriques, de diamètre 70 mm et de hauteur 12 ou 24 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. Les pierres poreuses sèches et les papiers filtres sont placés dans le cylindre au-dessus et en dessous de l'échantillon, le comparateur est mis en place sur le piston ; on alimente en eau par le haut et par le bas.

L'évolution du gonflement unidimensionnel est mesurée à l'aide de capteurs de déplacement au 1/1000 de mm. Les mesures de déplacement sont enregistrées électroniquement, pour des 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 jusqu'à retrouver la hauteur initiale (1^{ère} méthode), ou soit seulement par la méthode à volume constant (2^{ème} méthode).

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, qui varie 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 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.

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 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.

4.7.2 Résultats

Gonflement libre

Les essais ont été menés sur l'ensemble des matériaux intacts (E-AVR-0, E-AVR-1, E-MBA-0, E-MBA-01, E-MBA-1, W-AVR-0, W-AVR-1, W-MBA-0), sur les colluvions E-AVR-C, et sur les matériaux (E-AVR-0R, E-MBA-1R) remaniés 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).

Les résultats sont regroupés dans le Tableau 4.7.1. A titre d'exemple les courbes de gonflement libre de E-AVR-0 sont données dans la Figure 4.7.2.

De l'analyse des résultats il ressort les remarques suivantes :

- Les courbes de cinétique de gonflement ont une forme classique avec 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 ;
- Une dispersion des résultats due essentiellement aux variations des conditions initiales est observée. Ainsi des échantillons prélevés côte à côte dans des blocs supposés être homogènes présentent parfois des teneurs en eau initiales différentes ;
- Les Argiles vertes intactes montrent un fort gonflement par rapport aux Marnes bleues intactes ;
- 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 de piston. En général leur taux de gonflement oscille entre 15 % et 27 %. On observe également, une légère décroissance du taux de gonflement lorsque le poids du piston augmente ;
- Le taux de gonflement des Argiles vertes, mesuré sous un piston de 2kPa augmente légèrement avec une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau initiale ;

- 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 ;
- A teneurs en eau voisines et pour un même poids du piston, les échantillons remaniés des 2 formations de l'Est présentent des taux de gonflement bien supérieurs à ceux des échantillons intacts :
 - E-AVR-0 $w\%=27$, $\Delta H/H_0$ intact=15,5, $\Delta H/H_0$ remanié=31 ;
 - E-MBA1 $w\%=24$, $\Delta H/H_0$ intact<1, $\Delta H/H_0$ remanié=15 ;
- Les Argiles vertes de l'Ouest montrent un taux de gonflement plus faible que les Argiles vertes de l'Est. Ceci peut s'expliquer par la teneur en eau initiale beaucoup plus élevée.

Echantillons	w_0 (%)	w_f (%)	H_0 (mm)	γ_s (kN.m^{-3})	γ_h (kN.m^{-3})	γ_d (kN.m^{-3})	$\Delta H/H_0$ (%)	e_0	Contrainte apportée par le piston (kPa)	Orientation
E-AVR-0	22,0	32,9	24,00	26,1	19,9	16,3	17,5	0,64	6,29	perpend.
	27,8	43,0	12,00	26,1	19,0	14,8	15,8	0,78	6,29	parallèle
	23,0	35,7	12,00	26,1	20,1	16,3	21,7	0,60	6,29	parallèle
	24,3	33,8	12,00	26,1	20,0	16,1	14,2	0,63	6,29	parallèle
	23,6	33,0	12,00	26,1	19,6	15,9	13,6	0,66	6,29	parallèle
	24,9	39,3	20,00	26,1	19,7	15,8	18,8	0,65	2,00	parallèle
	28,0		18,00	26,1	19,2	15,0	16,2	0,74	2,00	parallèle
	26,0		20,00	26,1	20,1	15,9	15,5	0,64	2,00	parallèle
	22,7		20,00	26,1	20,0	16,3	22,8	0,60	2,00	parallèle
	23,8		20,00	26,1	20,2	16,3	23,0	0,60	2,00	parallèle
	25,4		24,30	26,1	19,8	15,8	26,4	0,60	0,70	parallèle
25,0	44,0	23,00	26,1	19,7	15,7	26,0	0,66	0,70	parallèle	
E-AVR-0 (remanié)	27,3	51,3	19,80	26,1	19,5	15,3	32,0	0,70	2,00	
	27,6	49,2	19,76	26,1	19,5	15,3	31,0	0,70	2,00	

Echantillons	w_0 (%)	w_f (%)	H_0 (mm)	γ_s (kN.m^{-3})	γ_h (kN.m^{-3})	γ_d (kN.m^{-3})	$\Delta H/H_0$ (%)	e_0	Contrainte apportée par le piston (kPa)	Orientation
E-AVR-1	21,8	40,0	24,00	26,3	20,0	16,4	23,0	0,59	0,70	parallèle
	25,3	43,6	20,06	26,3	20,0	16,0	27,8	0,65	0,70	parallèle
	26,4	43,9	20,06	26,3	19,9	15,8	25,6	0,67	0,70	parallèle
	22,4	40,6	15,50	26,3	20,7	16,9	27,8	0,55	0,70	perpend.

E-AVR-C	24,9	41,4	20,00	27,8	19,8	15,8	18,5	0,76	2,00	
	25,9	38,2	20,06	27,8	20,0	15,9	19,0	0,75	2,00	
	21,8	40,8	20,04	27,8	20,4	16,7	24,0	0,66	2,00	

Echantillons	w _o (%)	w _f (%)	H _o (mm)	γ _s (kN.m ⁻³)	γ _h (kN.m ⁻³)	γ _a (kN.m ⁻³)	ΔH/Ho (%)	e ₀	Contrainte apportée par le piston (kPa)	Orientation
E-MBA-1	23,3		20,10	25,6	20,4	16,5	1,24	0,55	2,00	parallèle
	23,7		20,10	25,6	20,4	16,5	0,84	0,55	2,00	parallèle
	23,4		20,10	25,6	20,5	16,6	0,76	0,54	2,00	parallèle
	23,4		20,10	25,6	20,4	16,6	1,21	0,55	2,00	parallèle
	32,0	36,0	24,00	25,6	18,8	14,2	4,50	0,80	0,70	parallèle
	27,6	28,4	12,00	25,6	19,2	15,0	1,20	0,70	6,29	parallèle
	28,6	29,7	12,00	25,6	18,5	14,4	1,10	0,78	6,29	parallèle
E-MBA-1 (remanié)	34,2	55,7	20,00	25,6	18,5	13,8	26,00	0,86	2,00	
	23,9	35,1	20,00	25,6	20,2	16,3	15,00	0,57	2,00	
E-MBA-01	23,8	27,2	19,90	27,6	20,3	16,4	3,80	0,68	2,00	parallèle
	25,5	33,5	20,10	27,6	19,8	15,8	8,60	0,75	2,00	parallèle
	27,0	36,6	20,10	27,6	19,7	15,5	10,00	0,78	2,00	parallèle
	26,7	32,1	20,10	27,6	19,8	15,6	6,40	0,77	0,50	parallèle
	23,9	31,9	20,00	27,6	20,0	16,1	6,30	0,71	0,50	parallèle
E-MBA-0	37,0	40,3	20,10	26,1	18,3	13,4	2,50	0,95	0,80	parallèle
	40,0	43,0	24,00	26,1	18,0	12,9	1,50	1,03	0,70	parallèle
	34,6	40,0	20,10	26,1	18,4	13,7	2,40	0,87	2,00	parallèle
	35,7	38,5	20,10	26,1	18,4	13,6	1,00	0,89	2,00	parallèle

Echantillons	w _o (%)	w _f (%)	H _o (mm)	γ _s (kN.m ⁻³)	γ _h (kN.m ⁻³)	γ _a (kN.m ⁻³)	ΔH/Ho (%)	e ₀	Contrainte apportée par le piston (kPa)	Orientation
W-AVR-0	32,2	39,5	15,00	26,8	19,5	14,8	10,40	0,82	0,50	Parallèle
	32,0		15,00	26,8	19,5	14,8	9,00	0,81	0,50	Parallèle
	32,0	39,4	20,10	26,8	19,3	14,6	9,90	0,83	0,50	Parallèle
	32,0	39,0	20,00	26,8	19,3	14,6	8,60	0,80	0,50	Parallèle
	29,9	36,9	20,05	26,8	19,5	15,0	8,40	0,79	2,00	Parallèle
	29,8	37,5	19,82	26,8	19,6	15,1	10,40	0,78	2,00	Parallèle
W-AVR-1	31,1	35,2	19,92	27,0	19,4	14,8	5,90	0,80	2,00	Parallèle
	31,6	37,8	19,92	27,0	19,2	14,6	7,80	0,83	2,00	Parallèle
	30,3	40,1	20,10	26,7	19,4	14,9	9,80	0,80	0,50	Parallèle
	30,6	38,9	19,96	26,7	19,5	15,0	12,30	0,80	0,50	Parallèle

W-MBA-0	28,0	29,3	20,00	26,0	19,6	15,3	1,10	0,68	0,50	Parallèle
	27,5	28,1	20,00	26,0	19,9	15,6	0,60	0,65	0,50	Parallèle
	27,9	30,8	19,92	25,8	19,4	15,2	1,12	0,70	2,00	Parallèle
	26,8	29,0	20,06	25,8	19,6	15,4	1,12	0,70	2,00	Parallèle

Tableau 4.7.1 : Résultats du gonflement libre de l'ensemble des échantillons pour différentes contraintes apportées par le piston

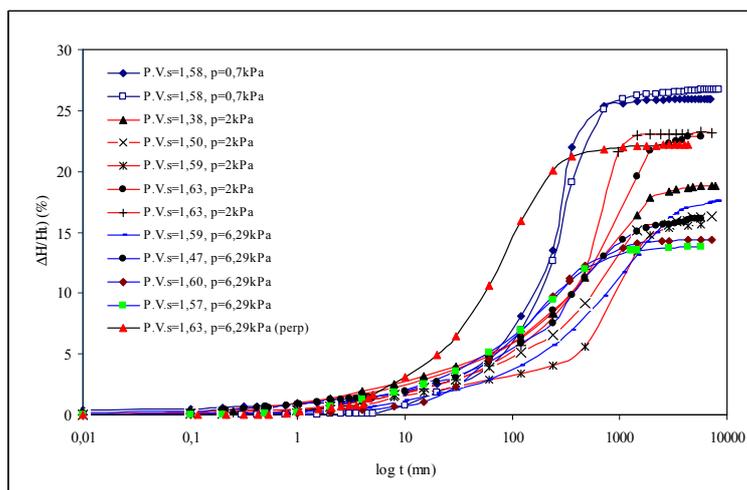


Figure 4.7.2 : Cinétique du gonflement – relation $\Delta H/H_o = f(\log t)$ de l'Argile verte de Romainville

Pression de gonflement

Le Tableau 4.7.2 et le Tableau 4.7.3 synthétisent les résultats des pressions de gonflement obtenues sur l'ensemble des échantillons. Sur la Figure 4.7.3 et la Figure 4.7.4 sont donnés des exemples de mesure de pression de gonflement, respectivement par la méthode de gonflement libre suivi d'une consolidation, et par la méthode du volume constant.

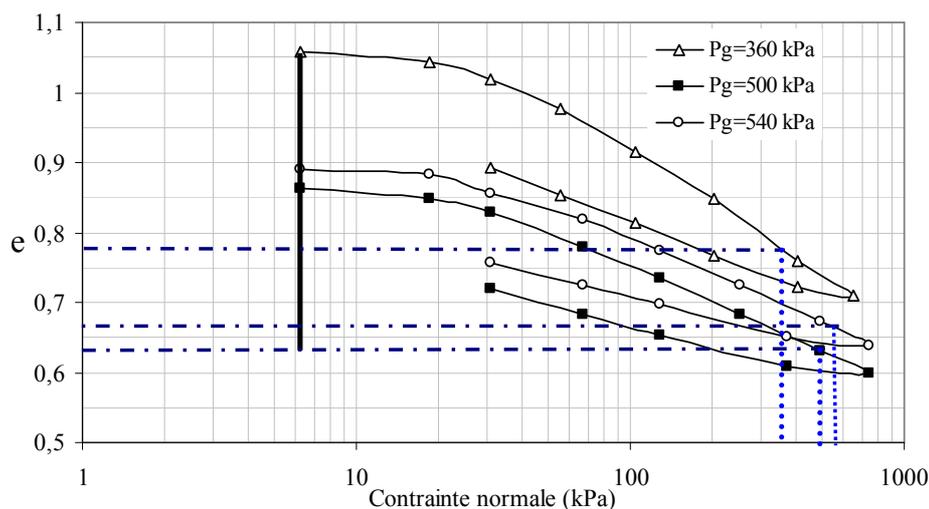


Figure 4.7.3 : Méthode du gonflement libre suivi d'une consolidation. La pression de gonflement correspond à la pression pour laquelle l'échantillon repasse par la valeur de l'indice des vides initial. Exemple de AVR à 3 indices des vides initiaux différents

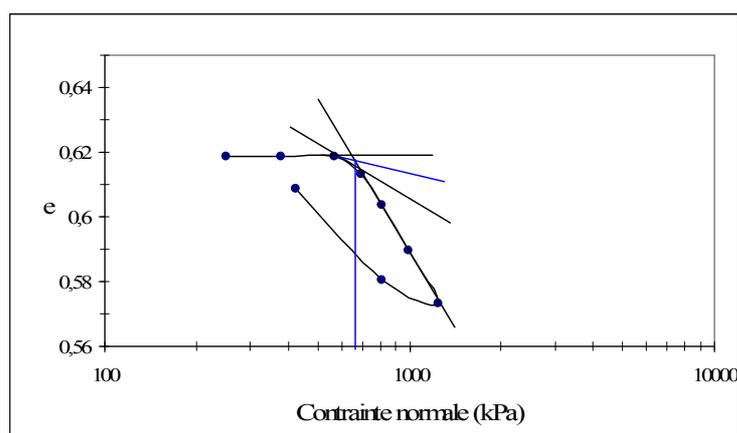


Figure 4.7.4 : Méthode à volume constant

On note que, d'une méthode à l'autre, les résultats sont assez différents, mais aussi que pour une même méthode les valeurs obtenues varient. Par exemple, pour les échantillons E-AVR-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.

Par contre, les valeurs obtenues par la méthode à volume constant sont voisines. Les échantillons E-AVR-1 ont une pression de gonflement de l'ordre de 900 kPa, E-AVR-0 de 700 kPa, E-MBA-1 de 110 kPa, W-AVR-0 de 200 kPa et W-AVR-1 de 170 kPa.

La deuxième méthode, à volume constant, permet aussi de déterminer la pression de préconsolidation σ_p' .

échantillon	Wi (%)	Wf (%)	Hi (mm)	γ (kN.m ⁻³)	γ_f (kN.m ⁻³)	e_0	σ_g (kPa)	Méthode
E-AVR-1	26	41	20,1	19,9	15,8	0,67	910	VC
	26	42	20,2	20,0	15,9	0,67	900	VC
E-AVR-0 (perp)	29	43	12	19,0	14,7	0,78	360	GL-C
	25	33	12	19,6	15,7	0,66	540	GL-C
	25	34	12	20,0	16,0	0,63	500	GL-C
	25	33	24	19,9	15,9	0,64	990	GL-C
	24	36	12	20,1	16,3	0,60	990	GL-C
							σ_p' (kPa)	
	24	34	12	19,7	15,9	0,64	500	CNS.
	23	34	12	19,9	16,1	0,62	550	CNS.
							σ_g (kPa)	
	26	38	12	19,5	15,5	0,68	700	VC
24	36	12	19,5	15,8	0,65	670	VC	
E-AVR-C							σ_g (kPa)	
	28		20,1	19,7	15,4	0,80	600	VC
	27		20,1	20,0	15,8	0,76	600	VC
E-MBA-1 (litée)							σ_g (kPa)	
	28	28	12	19,2	14,9	0,70	80	GL-C
	29	30	12	18,5	14,3	0,78	90	GL-C
	27	29	12	19,1	14,8	0,70	110	VC
	38	40	12	18,1	12,9	0,96	180	VC
	37	39	12	18,1	13,0	0,94	235	VC
							σ_p' (kPa)	
36	38	12	18,6	13,5	0,86	200	CNS.	
E-MBA-01							σ_g (kPa)	
	27	32	20,1	19,8	15,6	0,77	550	GL-C
	24	32	20,0	20,0	16,1	0,71	750	GL-C
	30	36	20,1	19,6	15,1	0,83	450	VC
	27	30	20,1	20,0	15,8	0,75	470	VC

Tableau 4.7.2 : Pression de gonflement et pression de préconsolidation pour les Argiles vertes et les Marnes bleues de l'Est (Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation, CNS = consolidation)

échantillon	W _i (%)	W _f (%)	H _i (mm)	γ (kN.m ⁻³)	γ_f (kN.m ⁻³)	e_0	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	19,3	14,6	0,84	230	GL-C
	32,2	39,5	15	19,5	14,8	0,82	250	GL-C
	32,1	38,5	20,1	19,3	14,6	0,83	190	VC
	31,9	40,1	15	19,6	14,8	0,81	210	VC
							σ_p' (kPa)	
	32,7	41,4	12	19,4	14,6	0,83	200	CNS.
	34,0	38,9	20,1	19,2	14,4	0,86	200	CNS.

W-AVR-1							σ_g (kPa)	
	30,3	40,1	20,1	19,40	14,90	0,80	400	GL-C
	30,6	38,9	20,0	19,50	15,00	0,8	480	GL-C
	31,9	39,1	20,1	19,4	14,7	0,80	160	VC
	33,0	38,1	20,1	19,5	14,7	0,78	170	VC
							σ_p' (kPa)	
	31,0	38,8	20,1	19,4	14,8	0,81	300	CNS.
	30,7	37,9	20,1	19,4	14,9	0,81	280	CNS.
W-MBA-0							σ_g (kPa)	
	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	150	VC
	27,9	28,9	20	19,7	15,4	0,69	160	VC

Tableau 4.7.3 : Pression de gonflement et pression de préconsolidation pour les Argiles vertes de l'Ouest (Méthodes : VC = volume constant, GL-C = gonflement libre-consolidation, CNS = consolidation)

4.8 GONFLEMENT LIBRE SOUS SOLlicitATIONS HYDRIQUES CYCLIQUES

Des échantillons taillés à partir d'un même bloc sont mis en place suivant les procédures décrites précédemment. 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. 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 $\Delta H/H_0$.

Sur la Figure 4.8.1a sont représentées les courbes de gonflement obtenues sur un même échantillon de AVR au cours de cycles successifs ainsi que la courbe de gonflement obtenue sur un échantillon remanié au laboratoire (préparé à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité, puis déshydraté à l'air libre jusqu'à une teneur en eau équivalente à la teneur en eau naturelle). On observe que la déformation maximale se produit au deuxième cycle. Le taux de gonflement du premier cycle de mouillage est plus grand que celui du cinquième cycle, cependant la cinétique de gonflement est plus lente. Ce dernier point témoigne d'une plus faible perméabilité du matériau à l'état initial. A partir du deuxième cycle, le gonflement est sensiblement plus rapide. Ceci peut être attribué à la fissuration observée au cours du 1^{ère} séchage qui, en créant des chemins préférentiels, a un impact sur la perméabilité

du sol à la réhumidification. A partir du 3^{ème} cycle la déformation se stabilise (taux de gonflement compris entre 19 et 21 %), mais l'échantillon ne retrouve pas son épaisseur initiale à la fin de chaque séchage (Figure 4.8.1b et Figure 4.8.1c). Pour tous les échantillons testés, l'amplitude de gonflement est plus grande que l'amplitude de retrait, le phénomène n'est pas entièrement réversible. Par conséquent une augmentation progressive du volume du sol due à l'accumulation de gonflements résiduels est observée (Figure 4.8.1c). Le taux de retrait varie très peu au cours des cycles humectation/séchage (Figure 4.8.1d).

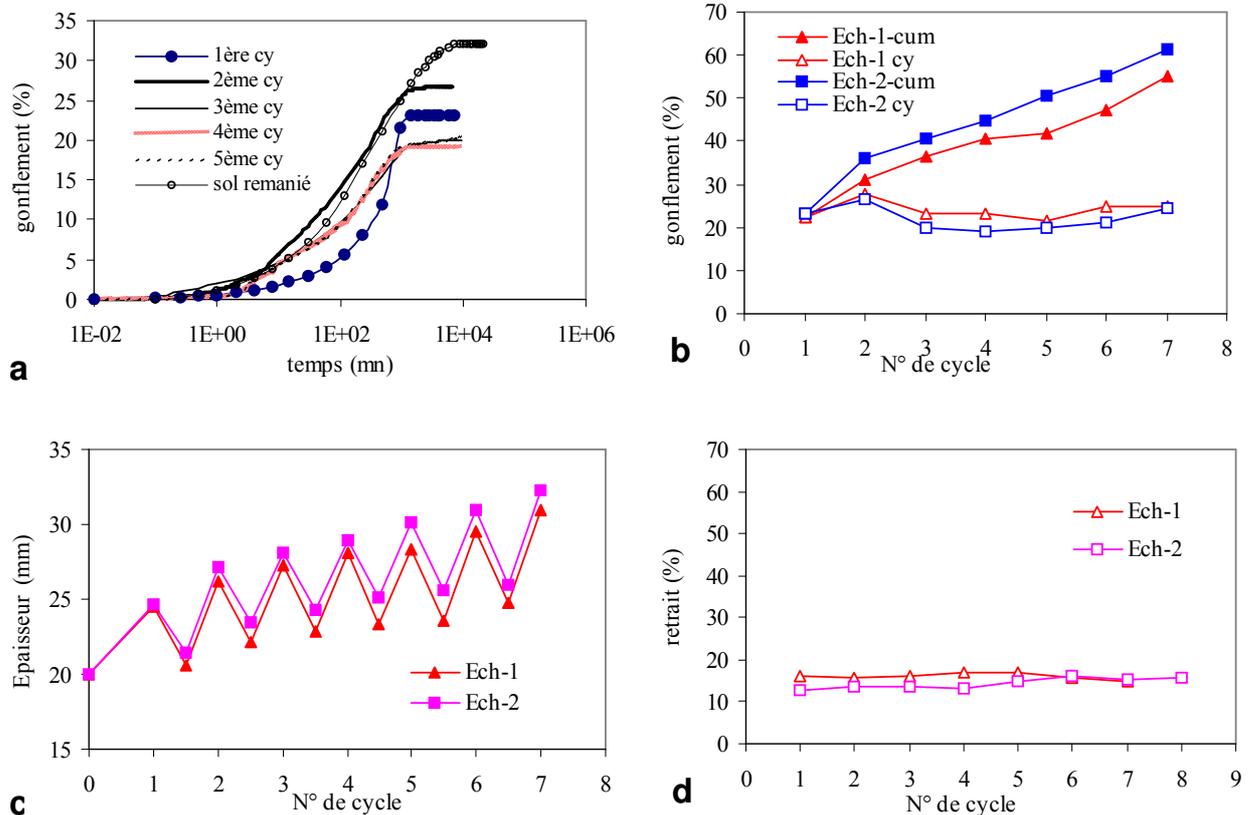


Figure 4.8.1 : a) Courbes de gonflement libre de l'Argile verte de Romainville au cours de 5 cycles successifs imbibition-séchage complet ; b) Taux de gonflement $\Delta h/h_0$ (■, ▲) et $\Delta h/h_i$ (□, △) pour les échantillons 1 et 2 ; c) Variations de l'épaisseur des échantillons au cours des cycles successifs ; d) Taux de retrait des échantillons pour chaque cycle

Néanmoins, le taux de gonflement au premier cycle ou au cours des cycles suivants n'atteint pas le taux de gonflement observé pour le sol remanié dont l'état initial (teneur en eau et densité sèche) est proche du sol intact. La différence du comportement observée entre les échantillons intacts et remaniés peut être attribuée à la présence de liaison (ou de ciment) entre les grains. Alors que ces liens sont détruits par le remaniement, ils ne sont pas totalement rompus au cours du gonflement des échantillons intacts et vont s'opposer aux pouvoir gonflant des argiles. Ceci est en accord avec les observations microstructurales du paragraphe 5.

Sur la Figure 4.8.2a sont également représentées les courbes de gonflement obtenues sur un échantillon de MBA au cours de cycles successifs d'humectation/séchage ainsi que la courbe

de gonflement obtenue sur un échantillon remanié au laboratoire (préparé à une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité, puis déshydraté à l'air libre jusqu'à une teneur en eau équivalente à la teneur en eau naturelle). On note que même si MBA contient un pourcentage de smectite plus élevé que AVR, son taux de gonflement au premier cycle est très faible (< 1 %) par rapport à celui de AVR (23 %) ainsi que celui de MBA remanié (15 %) (Figure 4.8.2a).

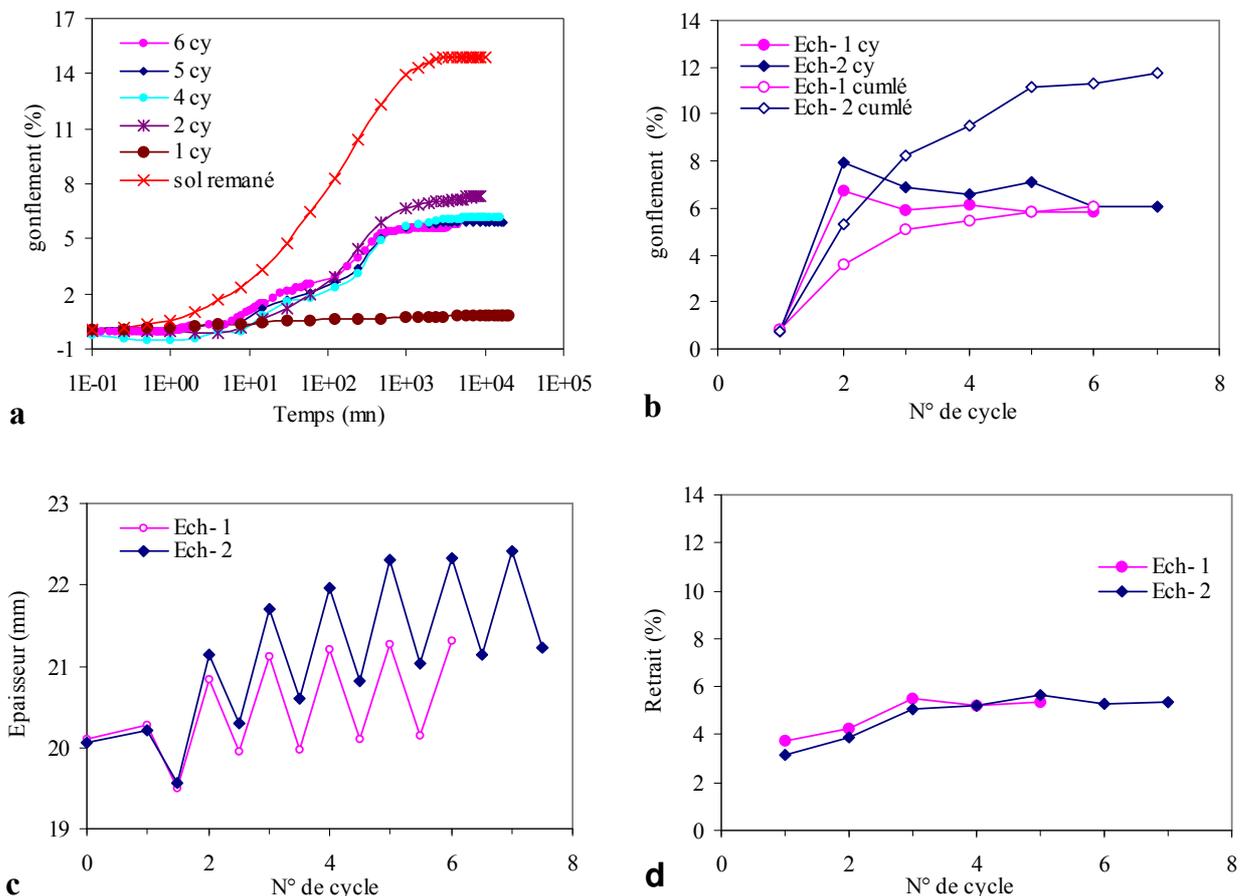


Figure 4.8.2 : a) Courbes de gonflement libre de la Marne bleue d'Argenteuil au cours de 6 cycles successifs imbibition-séchage complet ; b) Taux de gonflement $\Delta h/h_0$ ($\diamond \circ$) et $\Delta h/h_i$ ($\blacklozenge \bullet$) pour les échantillons 1 et 2 ; c) Variations de l'épaisseur des échantillons au cours des cycles successifs ; d) Taux de retrait des échantillons pour chaque cycle

Ceci peut être attribué 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 comme le suggèrent Bauer-Plaindoux et al. (1997) et Audiguier et al. (2007). En effet, les augmentations du taux de gonflement (<1 % jusqu'à 6 %, Figure 4.8.2b) et du retrait (< 4 % jusqu'à environ 6 %, Figure 4.8.2d) au cours des cycles successifs bien que faibles renforcent cette hypothèse. Ainsi la rupture des liaisons entre les minéraux et la déstructuration du sol facilite l'accès de l'eau aux argiles et ainsi leur permet d'exprimer leurs propriétés de gonflement, comme c'est le cas pour le sol remanié. En effet, Le Roux (1972), Pejon et al. (1997), Bauer-Plaindoux et al. (1997), et Serratrice (2007) ont remarqué que seule la 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. Néanmoins la déformation amorce une stabilisation à partir du 3^{ème} cycle (Figure 4.8.2b). Par ailleurs, comme il est observé pour AVR, l'échantillon ne retrouve pas son épaisseur initiale à la fin de chaque séchage (Figure 4.8.2b). Par conséquent une augmentation faible mais progressive du volume du sol due à l'accumulation de gonflement résiduel est observée (Figure 4.8.2c).

Cette étude ainsi que l'analyse des paramètres microstructuraux ont fait l'objet de publications (cf. Publications Armines – Centre de Géosciences : Articles 2, 9, volume II : annexes 2).

4.9 CONCLUSIONS

L'analyse de l'ensemble des résultats de cette étude permet d'énoncer plusieurs caractéristiques principales 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 Parisis (ouest de Paris).

4.9.1 Minéralogie

- L'analyse diffractométrique montre 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 des Marnes bleues supérieures et inférieures avec une présence de kaolinite encore plus faible ;
- 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 ;
- Une étude plus fine des profils de la formation d'AVR des deux sites a mis en évidence que la répartition des carbonates étaient identiques d'un site à l'autre. La première moitié inférieure est composée essentiellement de calcite, alors que la dolomite prédomine dans la moitié supérieure ;
- Le quartz est présent dans tous les échantillons en quantité significative, à l'exception des Marnes bleues inférieures. L'étude des profils d'AVR montrent que la répartition est séquentielle et que le taux moyen diminue vers le sommet de la formation ;
- 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.

4.9.2 Caractéristiques géotechniques

- L'ensemble des sols prélevés dans les deux gisements a une granulométrie fine (plus de 78 % < 2 μ m) ; ils sont plastiques, voire très plastiques et peu denses ;
- Les Marnes bleues des 2 carrières ont un pourcentage de matières organiques compris entre 1 et 3 %, alors qu'il n'est que de 0,5 % pour les Argiles vertes ;
- Toutes les formations sont marquées par une porosité élevée (comprise entre 42 et 51 %) ;
- 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. Or les résultats obtenus sur les gonflements libres démontrent le contraire ;
- De bonnes corrélations sont notées entre la limite de liquidité, W_L , la limite de plasticité, W_p , et la valeur de bleu pour les échantillons faiblement marneux. Mais compte tenu du faible nombre d'échantillons ces résultats doivent être considérés avec prudence ;
- La limite de retrait obtenu 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 ;
- L'étude des profils de AVR 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.

4.9.3 Caractéristiques hydriques

- Pour chaque formation, les courbes de rétention sont confondues, montrant une certaine homogénéité des échantillons ;
- 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 ;
- La limite de retrait et le point d'entrée d'air sont confondus dans le cas de AVR, alors qu'ils sont éloignés l'un de l'autre pour MBA. 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.

4.9.4 Fissuration

Les essais de séchage et d'humidification mettent en évidence des différences dans le processus de fissuration des 2 formations, mais aussi pour une même formation entre l'état intact et remanié.

- Le processus de fissuration de L'Argile verte de Romainville intacte au cours des cycles séchage-humidification est initié par la réouverture d'anciens plans de micro-

cisaillement ou « slickensides », qui peut engendrer la destruction de l'échantillon pour une teneur en eau d'imbibition supérieure à la limite de retrait ;

- La Marne bleue d'Argenteuil intacte ne présente aucune fissure au cours des cycles séchage-imbibition quelle que soit la teneur en eau. Cette absence de fissures peut être attribuée au squelette semi-rigide, formé par les carbonates, qui contrarie les variations de volumes ;
- L'Argile verte remaniée, quelle que soit la géométrie de l'éprouvette, ne se fissure pas ; le seul contre-exemple correspond à une fissuration très localisée ;
- A l'inverse, la Marne bleue remaniée développe des fissures en polyèdres 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.

4.9.5 Caractéristiques microstructurales

- Les 2 formations présentent des courbes unimodales correspondant à une microstructure matricielle ;
- Les images prises au MEB mettent en évidence une anisotropie du matériau avec un arrangement préférentiel des minéraux parallèlement au litage ;
- La courbe de distribution de pores des colluvions argileuses de AVR est bimodale, une famille prépondérante apparaît vers les faibles diamètres dénotant une déstructuration du matériau due au remaniement par les cycles successifs séchage-humidification ;
- Les 2 formations non remaniées n'ont pas le même comportement vis-à-vis du gonflement, alors que AVR est sensible au phénomène, MBA ne l'est pas ;
- A l'inverse lorsque les matériaux ont subi un remaniement au laboratoire (passage par la limite de liquidité et séchage jusqu'à teneur en eau naturelle), les 2 formations sont sensibles au gonflement ;
- La différence de comportement entre MBA intacte et remaniée corrobore les résultats obtenus sur les courbes de rétention. Les carbonates forment un squelette semi-rigide qui s'oppose au gonflement mais qui est détruit par le remaniement au laboratoire ;
- Les cycles successifs de séchage/humidification entraînent une évolution de la microstructure qui aboutit à une déstructuration du matériau.

4.9.6 Caractéristiques mécaniques

Les résultats obtenus à partir des essais de gonflement libre et des mesures de pression de gonflement menés dans des moules œdométriques conventionnels montrent une dispersion due aux variations des conditions initiales :

- Les Argiles vertes de l'Est montrent un fort gonflement par rapport aux Marnes bleues. En général leur taux de gonflement oscille entre 15% et 27%. Les Argiles vertes de l'Ouest montrent un taux de gonflement moins élevé. Une explication possible serait la

valeur de la teneur en eau initiale beaucoup plus élevée pour les Argiles vertes de l'Ouest ;

- Le taux de gonflement des Marnes bleues intactes est faible, en général moins de 3 %. Cette valeur n'évolue pas malgré une large gamme de teneurs en eau initiale (23 à 40 %) et un indice de plasticité supérieur à celui des Argiles vertes ;
- Les matériaux remaniés présentent un gonflement important, il passe de 15 à 31 % pour les Argiles vertes et de moins de 1 % à 15-26 % pour les Marnes bleues. Ces mesures sont en accord avec les remarques faites sur les courbes de rétention et l'évolution texturales.

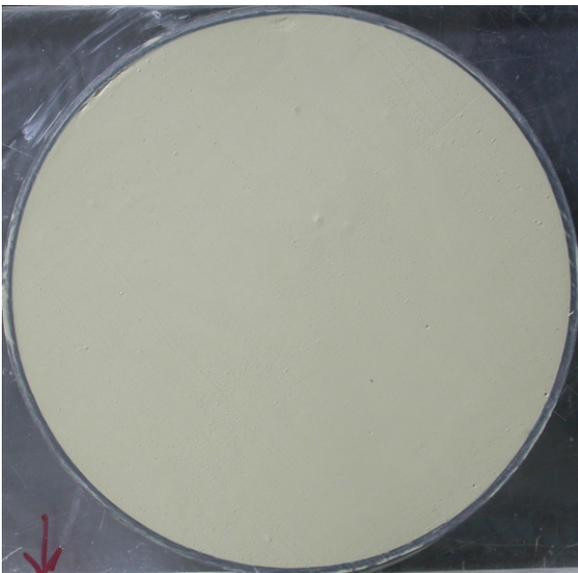
4.10 ANNEXES

4.10.1 Comparaison du comportement macroscopique d'échantillons de E-AVR-0 et de E-MBA-01 remaniés au cours d'un cycle de séchage/imbibition (support rugueux)

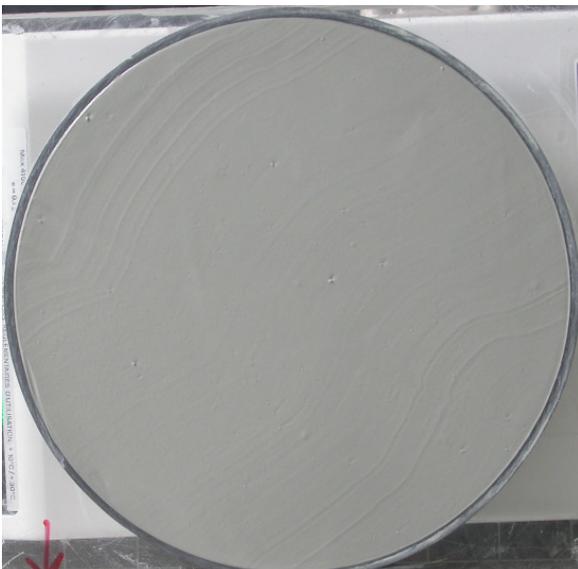
Séchage

Eprouvettes sur support rugueux (D = 185 mm, e = 20 mm)

E-AVR-0



E-MBA-01



Imbibition

E-AVR-0



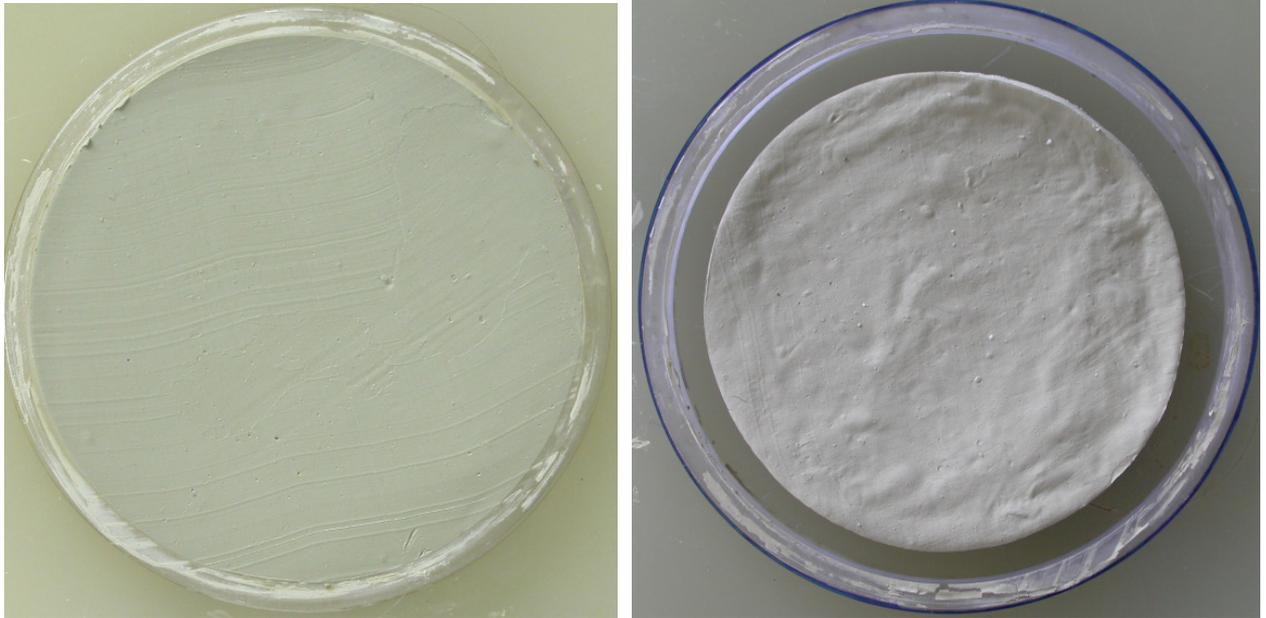
D=185mm, e=35mm support rugueux

E-MBA-01



D=185mm, e=20mm support rugueux

4.10.2 Comparaison de AVR et MBA remaniés pour les mêmes dimensions d'échantillons sur support lisse



D=88mm, e=5mm (E-AVR-0)



D=88mm, e=5mm (E-MBA-1)



D=185mm, e=10mm (E-AVR-0)



D=185mm, e=10mm (E-MBA-1)



D=185mm, e=15mm (E-AVR-0)



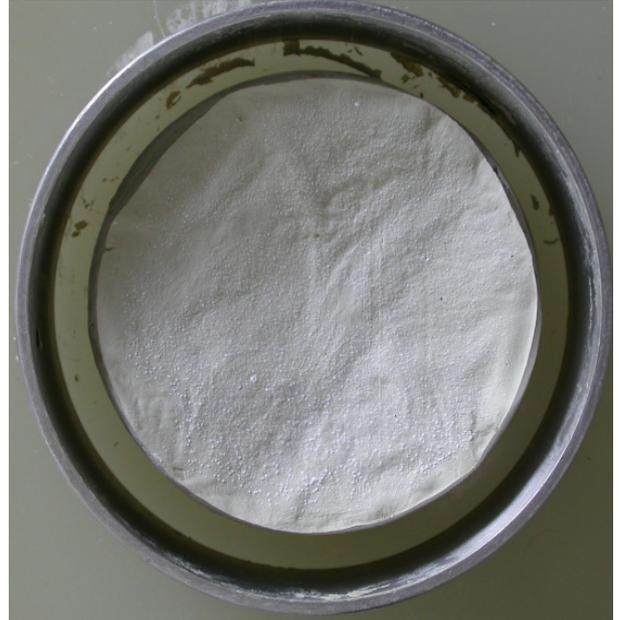
D=185mm, e=15mm (E-MBA-1)



D=185mm, e=20mm (E-AVR-0)



D=185mm, e=20mm (E-MBA-1)



D=70mm, e=24mm (E-AVR-0)



D=70mm, e=24mm (E-MBA-1)

Références bibliographiques

ASTM (1986). *Standard test methods for one – dimensional swell or settlement potential of cohesive soils*. ASTM D 4546 – 85.

Audiguier M., Delage P. (1987). *Etude microscopique et porosimétrique de sols fins naturels dans une perspective géotechnique*. Actes de la VII^{ème} Réunion Internationale de Micromorphologie des sols, Paris, juillet 1985, édité par N. Fedoroff, L.M. Bresson et M.A. Courty, 493-500, AFES.

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, pp.67-82.

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 Constructions « SEC 2008 », vol.1 pp.235-244.

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, 211-227.

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.

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.

Daupley X. (1997). *Etude du potentiel de l'eau interstitielle d'une roche argileuse et de relations entre ses propriétés hydriques et mécaniques. Application aux argilites du Toarcien de la région de Tournemire (Aveyron)*. Thèse doctorat ENSMP, 172 p.

Day R. W. (1995). *Ultimate Density of a compacted clay subjected to cycles of wetting and drying*. Environmental & Engineering Geoscience, vol.1(2), 229-232.

Day R. W. (1994). *Swell–Shrink behaviour of Compacted Clay*. J. Geotech. Eng. DIV., ASCE 120 (3), 618-623.

Dif A. E., Bluemel W. F. (1991). *Expansive soils under cyclic drying and wetting*. Geotech. Testing. Jour., 14 (1), pp. 96-102.

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 methods*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 67, n°3.

Laribi S., Audiguier M., Cojean R. (2008). *Influence du mode de séchage des sols argileux sur la détermination de la capacité d'échange cationique*. Symposium International Sécheresse et Constructions « SEC 2008 », vol.1 pp.215-222.

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, pp.83-90.

Le Roux A. (1972). *Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture*. Bull. liaison Labo. P. et Ch. 6, 155 - 178

Geremew Z., Audiguier M., Cojean R. (2008). *Comportement de sols argileux soumis à des sollicitations hydriques cycliques*. Symposium International Sécheresse et Constructions « SEC 2008 », vol.1 pp.245-256.

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.

Parcevaux P. (1980). *Etude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux*. Thèse doctorat, Université Paris VI, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris.

Pejon 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.

Serratrice J.-F. (2007). *Retrait-gonflement des sols argileux et des marnes*. Revue Française de Géotechnique, n° 120-121, pp. 107-120.

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.

Tourenq P. et Tran Ngoc Lan (1991). *Le rôle des argiles dans les matériaux de génie civil. Essais normalisés et spécifications*. Annales ITBTP, n°490.