
Étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux, rôle de l'état structural et de la minéralogie de la phase argileuse

I. INTRODUCTION

Un grand nombre d'études publiées ces vingt dernières années sur les argiles ont montré qu'il existait une relation étroite entre les propriétés de rétention en eau et des caractéristiques des particules d'argile (Tessier, 1984 ; Tessier et Pédro, 1984 ; Bruand et Zimmer., 1992 ; Tessier *et al.*, 1999). Dans le sol, les particules finement divisées comme les argiles ont la particularité de développer une grande surface spécifique au contact avec l'eau et de posséder une charge électrique superficielle importante. Ces fractions argileuses, grâce à leur fine taille ($< 2\mu\text{m}$), jouent un rôle privilégié dans la rétention en eau, la structuration des sols, mais aussi dans la rétention et la biodisponibilité des éléments chimiques indispensables aux plantes.

Les propriétés physiques des sols argileux sont fortement liées à la teneur en argile et aux caractéristiques de l'argile comme leur nature minéralogique, la taille des particules

élémentaires et la nature des cations échangeables (Tessier et Pédro, 1987 ; Quirk, 1994). En complément de l'étude minérale pour identifier la phase argileuse, la capacité d'échange en cations (CEC) et la surface spécifique du sol (Ss) sont souvent utilisées pour caractériser les constituants finement divisés (les argiles) de manière globale. Ces deux paramètres (CEC et Ss) ont été utilisés comme outil de prédiction et critère d'évaluation des propriétés des argiles. Ainsi, il a été montré que la rétention en eau des sols argileux est liée à la capacité d'échange cationique et à la surface spécifique (Tessier *et al.*, 1992). Bruand et Zimmer (1992) ont montré aussi que la capacité d'échange en cations peut être considérée comme un estimateur des propriétés de rétention en eau dans les horizons profonds de sols argileux.

Dans ce chapitre, nous avons pour objectif de poursuivre la discussion des propriétés de rétention en eau des sols en relation avec les caractéristiques de l'argile (propriétés de surface, CEC et la nature minérale de la phase argileuse) et l'histoire des contraintes hydriques de la phase argileuse ou histoire hydrique du sol.

II. MATERIEL ET METHODES

A. Les échantillons étudiés

Un ensemble de 61 horizons argileux (teneur en argile $> 0,3 \text{ g.g}^{-1}$) dont 15 horizons de surface (horizons A ou L) et 46 horizons de sub-surface (horizon E, B et C) a servi de base à la réalisation de cette étude. Ces horizons issus de sols situés en grande majorité dans le sud du bassin de Paris et développés à partir de marnes, de calcaires marneux, de calcaires durs du Jurassique, d'argile de décarbonatation oxfordien ou d'alluvions anciennes.

Les horizons pour lesquels nous avons déterminé les propriétés de rétention en eau possèdent une teneur en calcaire très faible ($\leq 0,02 \text{ g.g}^{-1}$) excepté pour les profils de Santeau, La Saussaye et Ouarville pour lesquels la teneur en calcaire varie de 0,222 à 0,656 g.g^{-1} (Tableau 7.1). La teneur en argile varie selon le type d'horizon de 0,32 à 0,66 g.g^{-1} pour les horizons de surface, et de 0,31 à 0,79 g.g^{-1} pour les horizons de sub-surface. La teneur en carbone organique varie de 0,012 à 0,028 g.g^{-1} pour les horizons de surface alors qu'elle est très faible pour les horizons de sub-surface ($\leq 0,011 \text{ g.g}^{-1}$). Les horizons de surface possèdent une capacité d'échange en cations qui varie de 19 à 46 $\text{cmol}_+. \text{kg}^{-1}$ du fait de la contribution de la matière organique pour les horizons de surface. Cette contribution de la

matière organique dans les horizons de sub-surface étudiés peut être négligée en raison de la faible teneur en carbone organique d'une teneur en argile $>0.30 \text{ g.g}^{-1}$ (Tableau 7.1).

Un sous ensemble de 12 horizons a été constitué pour étudier plus en détail les propriétés de rétention en eau en fonction des propriétés de surface de l'argile (CEC, Ss), de la minéralogie des particules d'argile et du volume de pores résultant de leur assemblage.

B. Méthodes d'études¹

Les propriétés de rétention en eau des horizons argileux ont été mesurées à l'aide des échantillons non perturbés de dimensions décimétriques prélevés en hiver en conditions proches de la capacité au champ. Ces échantillons ont été stockés de façon à préserver leur état d'hydratation *in situ* lors du prélèvement. Avant chaque série de déterminations, les échantillons ont été fragmentés à la main en mottes de 5 à 10 cm^3 de volume pour lesquelles l'organisation naturelle est conservée (Tableau 7.2). Le volume massique de ces mottes et leur teneur en eau ont été déterminés à partir d'un lot de dix à quinze mottes à l'aide de la méthode au pétrole (référence à citer). La teneur en eau correspondant à l'état d'hydratation lors du prélèvement a été déterminée avec les échantillons prélevés pour la détermination de la densité apparente (méthode au cylindre) (Tableau 7.2).

L'analyse par diffraction des rayons X a été effectuée sur la fraction argileuse ($<2\mu\text{m}$) selon la méthode développée par Robert et Tessier (1974). La séparation de la fraction argileuse ($< 2\mu\text{m}$) a été réalisée par sédimentation selon la loi de Stokes. Le mode opératoire détaillé de la séparation de la fraction argileuse est présenté dans l'annexe 5. La fraction $< 2 \mu\text{m}$ a été analysée sous la forme de :

- Poudre non orientée (diffractomètre INEL) afin d'identifier au mieux les minéraux présents ;
- Dépôt orienté (diffractomètre Thermo Electron ARL'XTRA équipé d'un détecteur solide Si (Li) à anticathode Cu) à l'état normal (saturé Mg^{2+} et à l'humidité relative du laboratoire) ;
- Dépôt orienté saturé Mg^{2+} et éthylène glycol de telle façon à tester le gonflement interfoliaire des argiles 2:1 ;
- Dépôts orientés saturés Mg^{2+} chauffés successivement à 110 puis 300 °C pour éliminer l'eau interfoliaire puis déshydroxyler la kaolinite.

¹ Se reporter aussi au chapitre II « Matériel et méthodes » de la thèse

Chapitre VII : Étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux, rôle de l'état structural et de la minéralogie de la phase argileuse

Tableau 7.1 : Caractéristiques des horizons argileux étudiés.

Nom	Horizon simple	Profondeur cm	Teneur en argile g.g ⁻¹	CaCO ₃ g.g ⁻¹	CO g.g ⁻¹	CEC mmol.g ⁻¹
Fréville 2-1	A	10 - 20	0,657	0	0,0151	0,459
St-Baudel2-1	A	3 - 13	0,561	0	0,0282	0,376
Santeau1-1	A	10 - 25	0,506	0,432	0,0158	0,464
Santeau2-1	A	12 - 22	0,506	0,432	0,0158	0,464
Branches1-1	A	15 - 25	0,489	0	0,0160	0,261
Mars 1-1	A	10 - 25	0,412	0	0,0199	0,232
Puits-de-1-1	A	4 - 14	0,409	0	0,0155	0,197
Puits-de-1-2	A	20 - 30	0,409	0	0,0133	0,195
Villabon 1-1	A	2 - 11	0,389	0	0,0167	0,213
Villabon 1-2	A	12 - 20	0,385	0	0,0161	0,213
Rébréchien1-1	A	5 - 20	0,382	0	0,0167	0,290
Rébréchien1-2	A	20 - 30	0,374	0	0,0165	0,278
Chevenon2-1	A	15 - 25	0,328	0	0,0227	0,188
La Saussay 12-1	A	5 - 15	0,318	0,222	0,0138	0,256
La Saussay 12-2	A	20-30	0,318	0,222	0,0121	0,256
moyenne			0,430	0,087	0,017	0,289
écart type			0,096	0,160	0,004	0,101
maximum			0,657	0,432	0,028	0,464
minimum			0,318	0,000	0,012	0,188
Ouarville 3-II-3	C	75 - 85	0,787	0	0,0064	0,464
Fréville 2-2	B	30 - 40	0,689	0,011	0,0048	0,456
Ouarville 3-II-2	C	55 - 65	0,664	0	0,0052	0,386
Santeau2-2	C	35 - 50	0,600	0,456	0,0033	0,474
Minard 1-4	B	68 - 85	0,591	0	0,0024	0,116
Villabon 1-4	B	45 - 54	0,575	0	0,0047	0,289
Santeau1-2	C	45 - 60	0,549	0,412	0,0105	0,502
Chaume1-4	C	105 - 115	0,542	0	0,0029	0,191
Puits-de-1-3	B	41 - 51	0,537	0	0,0040	0,233
Minard 1-3	B	35 - 45	0,531	0	0,0038	0,113
Lizy 1-5	B	73 - 82	0,527	0	0,0026	0,231
Rébréchien1-3	B	42 - 52	0,517	0	0,0037	0,330
Rébréchien1-4	B/C	60 - 70	0,514	0	0,0031	0,359
Chaume1-3	B	68 - 78	0,512	0	0,0030	0,187
Lichères1-5	C	100 - 110	0,508	0	0,0032	0,177
Lizy 1-4	B	52 - 61	0,489	0	0,0029	0,210
Branches1-2	B	35 - 45	0,489	0	0,0070	0,233
Villabon 1-3	B	30 - 39	0,481	0	0,0060	0,234
Donzy1-3	B	67 - 77	0,481	0	0,0019	0,128
St-Baudel2-2	C	28 - 38	0,467	0	0,0070	0,308
Montliard 1-4	C	60 - 75	0,465	0	0,0021	0,247
Lizy 1-3	B	35 - 44	0,432	0	0,0044	0,163
Ouarville 3-I-5	C	90 - 100	0,430	0,633	0,0035	0
Chaume1-2	B	42 - 52	0,425	0	0,0033	0,137
Minard 1-5	C	95 - 110	0,414	0	0,0011	0,110
Mars 1-2	C	42 - 52	0,382	0	0,0106	0,228
Ouarville 1-II-4	B	60 - 70	0,381	0	0,0060	0,227
Lichères1-4	B	62 - 72	0,379	0	0,0031	0,117
Ouarville 1-II-5	C	85 - 95	0,374	0,656	0,0038	0,112
StQuentin1-3	B	70 - 80	0,373	0	0,0026	0,161
Chevenon2-2	C	50 - 60	0,371	0	0,0098	0,201
Ingrannes 14	B	55 - 80	0,370	0	0,0020	0,154
Chevenon2-3	C	90 - 100	0,355	0	0,0063	0,204
Lichères1-3	B	42 - 52	0,352	0	0,0027	0,097
Huisseau13	B	41 - 71	0,347	0	0,0015	0,207
Montreuil 206-3	B	65 - 75	0,346	0,02	0,0003	0,189
Ouarville 1-II-3	B	40 - 50	0,344	0	0,0068	0,199
StQuentin1-2	B	35 - 45	0,332	0	0,0044	0,136
Ouarville 3-I-3	B	35 - 45	0,330	0	0,0057	0,175
Maria 2-3	B	40 - 50	0,330	0	0,0033	0,189
St-Baudel1-4	B/C	65 - 75	0,330	0	0,0014	0,179
St-Baudel1-3	B	42 - 52	0,325	0	0,0019	0,179
Maria 1-3	B	35 - 45	0,323	0	0,0037	0,165
La Saussay 12-3	B	31 - 41	0,313	0,615	0,0057	0,152
Maria 2-5	C	100 - 110	0,307	0	0,0021	0,189
Aix 1-5	B	100 - 110	0,305	0	0,0018	0,105
moyenne			0,445	0,060	0,004	0,214
écart type			0,113	0,178	0,002	0,107
maximum			0,787	0,656	0,011	0,502
minimum			0,305	0,000	0,000	0,097

Chapitre VII : Étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux, rôle de l'état structural et de la minéralogie de la phase argileuse

Tableau 7.2 : Volume massique à la capacité au champ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$), la teneur en eau massique au moment du prélèvement ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) et les teneurs en eau massiques aux 7 valeurs de potentiel.

Nom	V_t^{pr} $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	Teneur en eau massique ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)							
		W_{prbrut}	W_{10}	W_{15}	W_{20}	W_{25}	W_{30}	W_{35}	W_{42}
Fréville 2-1	0,769	0,375	0,401	0,395	0,379	0,352	0,335	0,288	0,264
St-Baudel2-1	0,862	0,438	0,473	0,420	0,390	0,383	0,378	0,303	0,278
Santeau1-1	0,755	0,358	0,371	0,366	0,356	0,330	0,323	0,279	0,253
Santeau2-1	0,755	0,358	0,371	0,366	0,356	0,330	0,323	0,279	0,253
Branches1-1	0,729	0,308	0,322	0,286	0,277	0,247	0,245	0,217	0,204
Mars 1-1	0,702	0,320	0,360	0,336	0,325	0,308	0,292	0,262	0,245
Puits-de-1-1	0,661	0,270	0,301	0,275	0,261	0,230	0,218	0,187	0,173
Puits-de-1-2	0,615	0,238	0,248	0,240	0,235	0,233	0,201	0,184	0,176
Villabon 1-1	0,690	0,260	0,316	0,290	0,267	0,249	0,235	0,200	0,180
Villabon 1-2	0,641	0,222	0,259	0,244	0,228	0,218	0,211	0,185	0,178
Rébréchien1-1	0,660	0,296	0,330	0,309	0,292	0,269	0,252	0,209	0,206
Rébréchien1-2	0,643	0,280	0,285	0,283	0,261	0,255	0,234	0,197	0,191
Chevenon2-1	0,740	0,332	0,347	0,329	0,317	0,298	0,275	0,250	0,222
La Saussay 12-1	0,687	0,254	0,307	0,280	0,257	0,247	0,223	0,187	0,166
La Saussay 12-2	0,623	0,218	0,254	0,235	0,213	0,209	0,201	0,178	0,165
moyenne	0,702	0,302	0,330	0,310	0,294	0,277	0,263	0,227	0,210
écart type	0,067	0,062	0,060	0,057	0,056	0,053	0,055	0,045	0,039
maximum	0,862	0,438	0,473	0,420	0,390	0,383	0,378	0,303	0,278
minimum	0,615	0,218	0,248	0,235	0,213	0,209	0,201	0,178	0,165
Ouarville 3-II-3	0,789	0,387	0,420	0,400	0,392	0,379	0,369	0,347	0,335
Fréville 2-2	0,749	0,357	0,378	0,368	0,357	0,338	0,321	0,295	0,262
Ouarville 3-II-2	0,649	0,240	0,273	0,252	0,245	0,238	0,236	0,233	0,220
Santeau2-2	0,724	0,328	0,356	0,343	0,327	0,316	0,286	0,263	0,252
Minard 1-4	0,608	0,210	0,229	0,208	0,192	0,183	0,176	0,167	0,157
Villabon 1-4	0,671	0,258	0,271	0,270	0,264	0,253	0,246	0,221	0,216
Santeau1-2	0,782	0,383	0,398	0,386	0,374	0,354	0,341	0,307	0,283
Chaume1-4	0,630	0,235	0,249	0,238	0,232	0,215	0,212	0,192	0,186
Puits-de-1-3	0,667	0,262	0,275	0,270	0,265	0,251	0,241	0,227	0,211
Minard 1-3	0,615	0,210	0,246	0,221	0,215	0,202	0,194	0,185	0,179
Lizy 1-5	0,650	0,219	0,273	0,248	0,243	0,231	0,225	0,217	0,205
Rébréchien1-3	0,690	0,300	0,324	0,320	0,315	0,290	0,281	0,244	0,227
Rébréchien1-4	0,685	0,293	0,315	0,302	0,284	0,268	0,249	0,242	0,210
Chaume1-3	0,638	0,239	0,246	0,234	0,232	0,221	0,217	0,195	0,180
Lichères1-5	0,633	0,249	0,265	0,248	0,242	0,235	0,231	0,215	0,197
Lizy 1-4	0,629	0,216	0,245	0,232	0,223	0,217	0,208	0,201	0,193
Branches1-2	0,685	0,256	0,278	0,260	0,249	0,222	0,219	0,199	0,186
Villabon 1-3	0,667	0,240	0,268	0,257	0,257	0,238	0,228	0,201	0,200
Donzy1-3	0,615	0,223	0,249	0,232	0,225	0,210	0,196	0,185	0,175
St-Baudel2-2	0,678	0,304	0,323	0,310	0,302	0,290	0,283	0,267	0,242
Montliard 1-4	0,643	0,235	0,258	0,244	0,228	0,221	0,198	0,160	0,150
Lizy 1-3	0,649	0,216	0,253	0,231	0,218	0,214	0,207	0,189	0,181
Ouarville 3-I-5	0,657	0,229	0,263	0,248	0,235	0,220	0,205	0,163	0,135
Chaume1-2	0,617	0,212	0,234	0,217	0,213	0,202	0,190	0,166	0,147
Minard 1-5	0,572	0,176	0,193	0,177	0,167	0,166	0,160	0,152	0,140
Mars 1-2	0,681	0,273	0,283	0,272	0,268	0,263	0,236	0,227	0,207
Ouarville 1-II-4	0,685	0,241	0,272	0,261	0,259	0,220	0,210	0,179	0,168
Lichères1-4	0,635	0,255	0,247	0,242	0,237	0,231	0,222	0,204	0,192
Ouarville 1-II-5	0,602	0,157	0,201	0,188	0,173	0,134	0,125	0,107	0,098
StQuentin1-3	0,611	0,208	0,222	0,211	0,204	0,200	0,195	0,172	0,160
Chevenon2-2	0,683	0,253	0,282	0,268	0,254	0,242	0,219	0,206	0,192
Ingrannes14	0,595	0,207	0,228	0,222	0,210	0,200	0,190	0,170	0,163
Chevenon2-3	0,657	0,244	0,265	0,254	0,241	0,238	0,212	0,208	0,194
Lichères1-3	0,652	0,275	0,275	0,266	0,245	0,236	0,220	0,188	0,153
Huisseau13	0,642	0,223	0,232	0,228	0,213	0,193	0,189	0,174	0,160
Montreuil 206-3	0,658	0,236	0,239	0,238	0,232	0,199	0,197	0,163	0,144
Ouarville 1-II-3	0,680	0,226	0,263	0,247	0,238	0,203	0,191	0,164	0,161
StQuentin1-2	0,619	0,209	0,224	0,211	0,204	0,198	0,177	0,161	0,149
Ouarville 3-I-3	0,661	0,228	0,255	0,239	0,225	0,208	0,183	0,159	0,145
Maria 2-3	0,639	0,217	0,238	0,230	0,221	0,206	0,180	0,158	0,150
St-Baudel1-4	0,564	0,174	0,187	0,175	0,169	0,154	0,148	0,137	0,131
St-Baudel1-3	0,574	0,193	0,217	0,194	0,175	0,169	0,160	0,148	0,137
Maria 1-3	0,629	0,221	0,244	0,238	0,224	0,196	0,175	0,155	0,148
La Saussay 12-3	0,698	0,253	0,301	0,274	0,238	0,235	0,203	0,195	0,168
Maria 2-5	0,589	0,175	0,197	0,192	0,182	0,178	0,156	0,131	0,117
Aix 1-5	0,592	0,184	0,200	0,182	0,176	0,172	0,168	0,155	0,141
moyenne	0,651	0,242	0,264	0,251	0,241	0,227	0,215	0,196	0,181
écart type	0,049	0,050	0,050	0,050	0,050	0,049	0,048	0,047	0,045
maximum	0,789	0,387	0,420	0,400	0,392	0,379	0,369	0,347	0,335
minimum	0,564	0,157	0,187	0,175	0,167	0,134	0,125	0,107	0,098

III. RESULTATS

A chaque valeur de potentiel, la variation de la quantité d'eau retenue par le sol s'explique en premier lieu par la variation de teneur en argile (fraction < 2 μ m) et la proportion de variance expliquée augmente lorsque le potentiel décroît. Ainsi, la teneur en argile explique 30 et 53 % de la variance de la teneur en eau du sol lorsque l'on passe de -10 hPa à -15000 hPa (Figure 7.1).

La variance de la teneur en eau en fonction de la teneur en argile à des valeurs particulières de potentiel (-10 hPa, -100 hPa, -1000 hPa et -15000 hPa) a aussi été étudiée pour un ensemble de 12 horizons de subsurface (E, B et C) sélectionnés pour identifier la phase argileuse (Figure 7.2). La teneur en argile explique 21 et 27 % de la variance de la teneur en eau du sol lorsque l'on passe de -10 hPa à -15000 hPa, excepté pour la teneur en eau à -1000 hPa où la teneur en argile explique 31 %. Cette faible proportion de variance expliquée pour les 12 horizons sélectionnés serait liée à des propriétés de rétention en eau très différentes d'un horizon à un autre.

IV DISCUSSION

Pour discuter les résultats, nous avons cherché à exprimer les propriétés de rétention de l'argile en fonction des propriétés de l'argile. Pour cela, nous avons tenté de calculer les propriétés de rétention d'eau de l'argile, sa capacité d'échange cationique, sa surface externe ainsi que le volume de pores développés par l'assemblage des particules élémentaires d'argile.

A. Les grandeurs utilisées pour discuter les résultats

Un sous ensemble de 12 horizons a été constitué pour étudier les propriétés de surface de l'argile (CEC, Ss) et la minéralogie des particules d'argile. La capacité d'échange en cations de l'argile (CEC_{arg}) et la surface spécifique de l'argile (Ss_{arg}) ont été calculées à partir de CEC et Ss en faisant l'hypothèse que ces deux propriétés étaient liées essentiellement à celles des particules composant la fraction granulométrique argile, elle-même étant composée essentiellement de minéraux argileux (Tableau 7.3) :

$$CEC_{arg} = CEC / T_{arg}$$

$$Ss_{arg} = Ss / T_{arg}$$

avec T_{arg}, teneur en argile granulométrique (g.g⁻¹).

La teneur en eau rapportée à la masse d'argile (W_{arg} en $g.g^{-1}$) a été aussi calculée à partir de la teneur en eau de l'échantillon déterminée aux différentes valeurs de potentiel de la façon suivante :

$$W_{arg} = W / T_{arg}$$

avec W_{arg} , teneur en gramme par gramme d'argile ($g.g^{-1}$).

Le volume poral développé par la phase argileuse (V_{arg} , en cm^3 par g d'argile) a été estimé lorsque le sol se trouve dans état d'hydratation proche de la capacité au champ (gonflement maximal) à partir du volume massique (V_t^{pr} , en cm^3 par g d'échantillon). En négligeant pour de tels échantillons le volume de pores biologiques et de fissures devant celui dû à la phase argileuse, on peut écrire :

$$V_t^{pr} = V_p + V_s$$

$$V_{arg} = V_p / T_{arg}$$

avec V_t^{pr} , volume massique de l'échantillon ($cm^3.g^{-1}$), V_{arg} , volume poral développé par la phase argileuse (cm^3 par g d'argile), V_s , volume massique de la phase solide égal à $0,377 cm^3.g^{-1}$.

B. Origine des variations de propriétés de rétention en eau

1. Importance du volume poral développé par la phase argileuse

Il a été montré par Bruand et Tessier (2000) que l'arrangement des particules argileuses tel que l'on peut le caractériser à l'aide de V_{arg} est une grandeur explicatrice des propriétés de rétention en eau des sols. C'est effectivement le cas pour les 12 échantillons étudiés ici, aussi bien à -10 hPa (Figure 7.3a) qu'à -15000 hPa (Figure 7.3b). La relation à -15000 hPa s'explique aisément par la taille des pores responsables de la rétention de l'eau à -15000 hPa (rayon équivalent $< 0.1 \mu m$) et l'origine de tels pores est liée à l'assemblage des particules d'argile. En revanche, la relation étroite entre la quantité d'eau retenue à -10hPa et V_{arg} est plus surprenante. Elle s'explique sans doute par le fait que la contribution de la porosité liée à l'assemblage des particules d'argile représente l'essentiel du volume poral d'un échantillon de sol argileux et que les pores de grande taille liée à l'activité biologique ou structurale ne représentent en fait qu'une très faible proportion de la porosité totale.

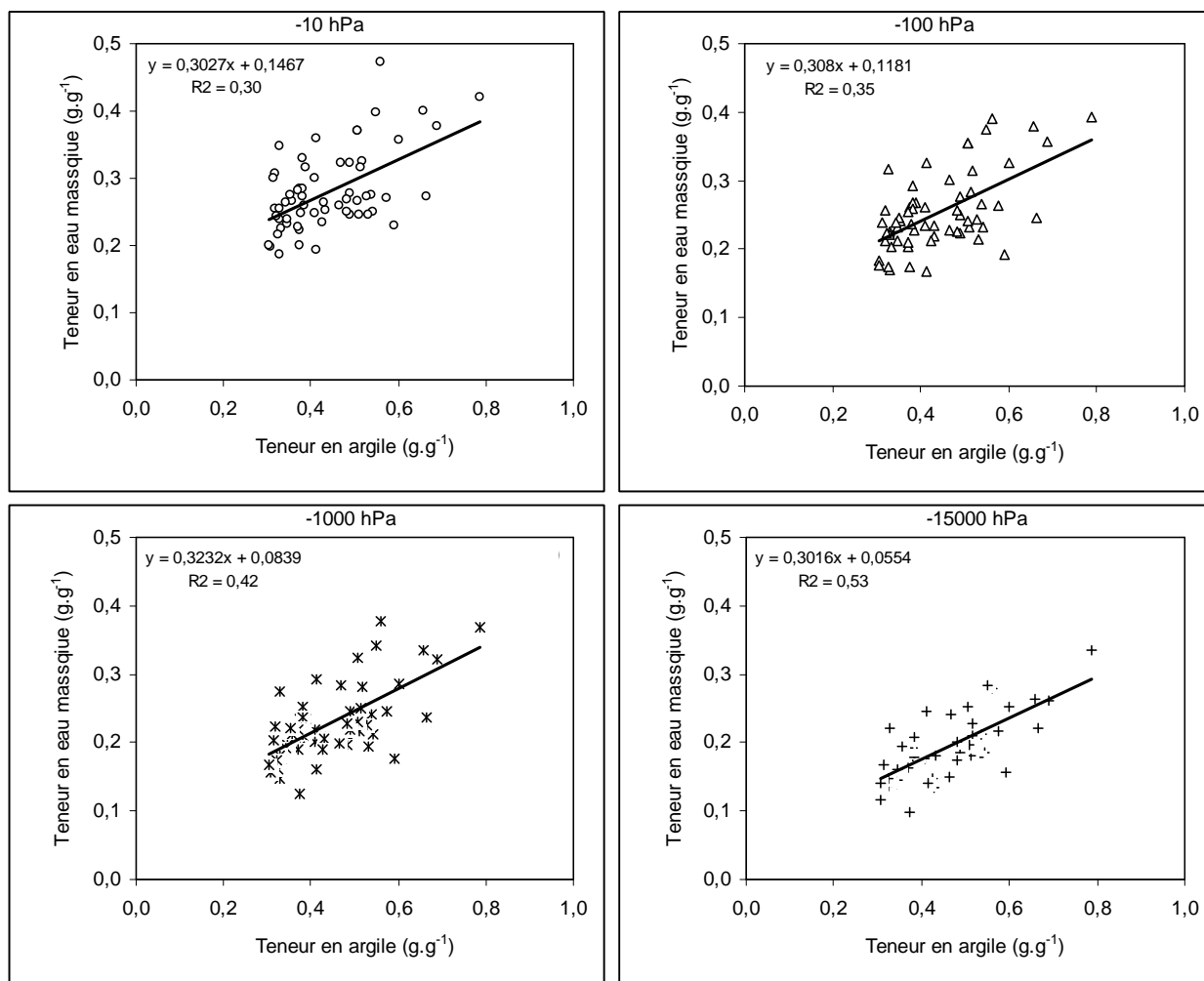


Figure 7.1 : La teneur en eau à -10 hPa, -100 hPa, -1000 hPa et -15000 hPa en fonction de la teneur en argile ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) pour les 61 horizons.

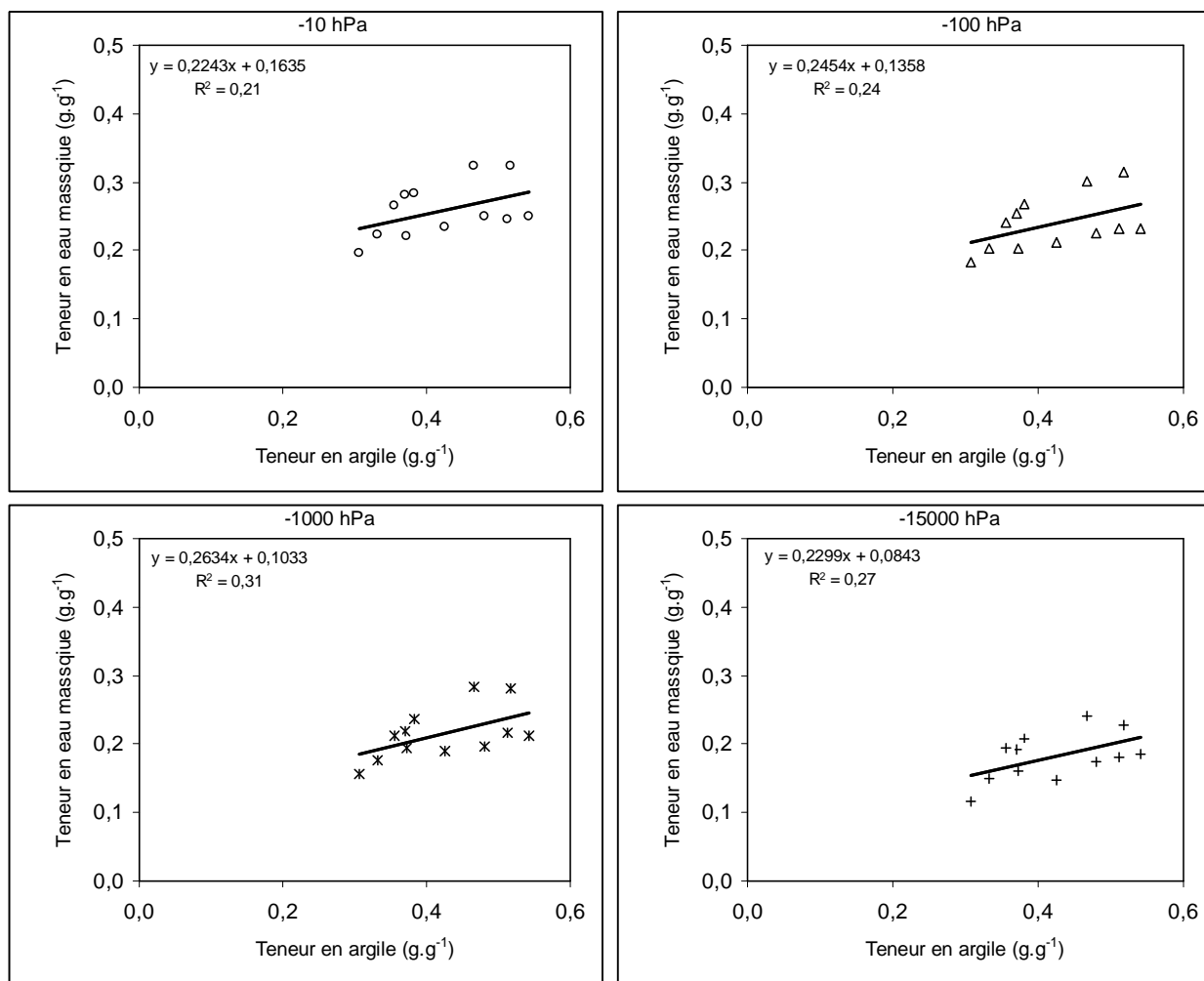


Figure 7.2 : La teneur en eau à -10 hPa, -100 hPa, -1000 hPa et -15000 hPa en fonction de la teneur en argile ($g \cdot g^{-1}$) pour les 12 horizons sélections pour identifier la phase argileuse.

Tableau 7.3: Capacité d'échange cationique rapportée à la masse d'argile (CEC_{arg}), surface spécifique de l'argile (Ss_{arg}), volume poral développé par la phase argileuse (V_{arg}) et la teneur en eau déduite (entre -10 hPa et -15000 hPa).

Nom échantillon	Horizon simple	Teneur en argile g.g ⁻¹	CEC_{arg} mmol+.g ⁻¹	V_{arg} cm ³ .g ⁻¹	Ss_{arg} m ² .g ⁻¹	ΔW_{arg} g.g ⁻¹
Maria 2-5	C	0,307	0,62	0,690	103	0,261
Chaume 1-4	C	0,542	0,35	0,466	82	0,116
Rébréchien 1-3	B	0,517	0,64	0,605	65	0,188
Mars 1-2	B	0,382	0,60	0,795	71	0,199
Chaume 1-3	B	0,512	0,36	0,509	85	0,129
Chevenon 2-2	C	0,371	0,54	0,824	57	0,243
Chevenon 2-3	C	0,355	0,57	0,789	53	0,200
St Quentin 1-3	B	0,373	0,43	0,626	68	0,166
St Budel 2-2	C	0,467	0,66	0,644	57	0,173
Chaume 1-2	B	0,425	0,32	0,565	58	0,205
St Quentin 1-2	B	0,332	0,41	0,730	63	0,226
Donzy 1-3	B	0,481	0,27	0,494	65	0,154
moyenne		0,422	0,48	0,645	69	0,188
écart type		0,079	0,14	0,123	15	0,043
maximum		0,542	0,66	0,824	103	0,261
minimum		0,307	0,27	0,466	53	0,116

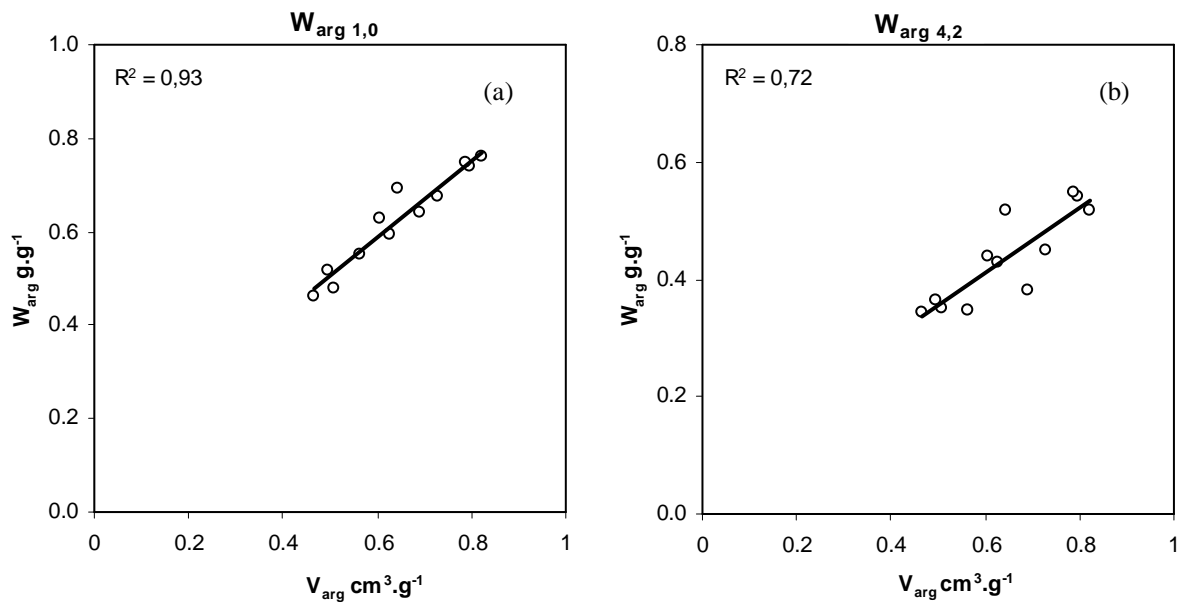


Figure 7.3 : Capacité du sol à retenir d'eau en fonction du volume poral à -10 hPa (a), et à -15000 hPa (b).

2. Déterminisme des variations du volume poral développé par la phase argileuse

Expliquer les propriétés de rétention en eau des sols argileux revient par conséquent à prendre en compte la quantité d'argile dans le sol (la proportion de fraction $< 2 \mu\text{m}$ en est une approximation) et le mode d'assemblage des particules d'argile (le volume poral développé par l'argile est une grandeur permettant de le quantifier). Il reste alors à rechercher le déterminisme des variations du volume poral développé par l'argile. Les variations de V_{arg} apparaissent être liées à celles de CEC_{arg} (Figure 7.4). La relation est nettement améliorée si l'on élimine 2 des 12 horizons sélectionnés ($R^2 = 0,699$) (Figure 7.4).

Ces résultats rejoignent ceux enregistrés par Bruand et Zimmer (1992). Les points qui divergent par rapport à la relation le feraient en raison d'une histoire hydrique particulière comme l'ont montré Bruand et Tessier (2000). Cependant, à la différence des résultats enregistrés par Bruand et Tessier (2000), nous n'avons pas enregistré de relation entre CEC_{arg} et Ss_{arg} (Figure 7.5). Dans le cas de nos échantillons, la capacité d'échange cationique serait liée à des charges localisées sur les surfaces externes et les surfaces internes (espaces interfoliaires au sein des particules élémentaires). A cela s'ajoute peut être aussi une variation de densité de charge électrique sur les surfaces en fonction des échantillons.

L'existence d'une relation entre V_{arg} et CEC_{arg} ainsi que le caractère explicatif de V_{arg} pour les propriétés de rétention en eau a pour conséquence que CEC_{arg} est aussi explicatrice des variations de rétention en eau des propriétés de rétention en eau. En effet, CEC_{arg} explique 81, 84 et 71% de la variance de la teneur en eau à respectivement -100 hPa, -1000 hPa et -15000 hPa (Figure 7.6). Cette relation entre la teneur en eau au différents potentiels et CEC_{arg} indiquerait que CEC_{arg} peut être considérée comme un estimateur du nombre moyen de feuillets par particule élémentaire d'argile de type 2 :1, la contribution des argiles de type kaolinite pouvant alors être négligé.

3. Importance de l'histoire hydrique

Pour discuter le rôle de l'histoire hydrique, nous avons procédé comme proposé par Bruand et Tessier (2000). Nous avons en effet regroupé les horizons de sub-surface en trois ensembles selon le degré de consolidation produit par les contraintes hydriques qu'ils ont subies, et cela tel qu'on peut l'apprécier par la forme de la courbe de rétention en eau de la phase argileuse. Nous avons comme Bruand et Tessier (2000) calculé la différence de teneur en eau de la phase argileuse (ΔW_{arg}) entre -10 hPa et -15000 hPa (Annexe 8).

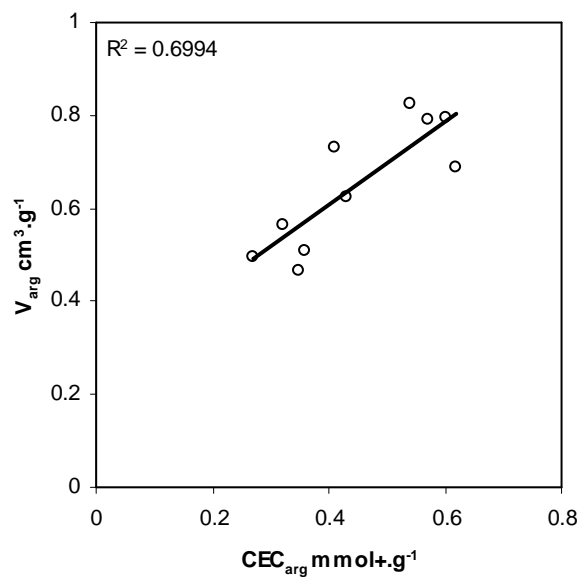


Figure 7.4 : Relation entre le volume poral développé par la phase argileuse et sa nature minéralogique.

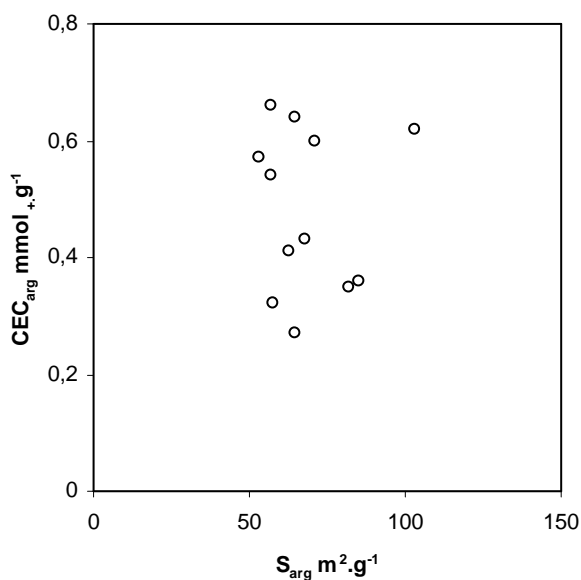


Figure 7.5 : Relation entre la capacité d'échange cationique rapportée à la masse d'argile (CEC_{arg}) et la surface spécifique (N_2 -BET) de l'argile.

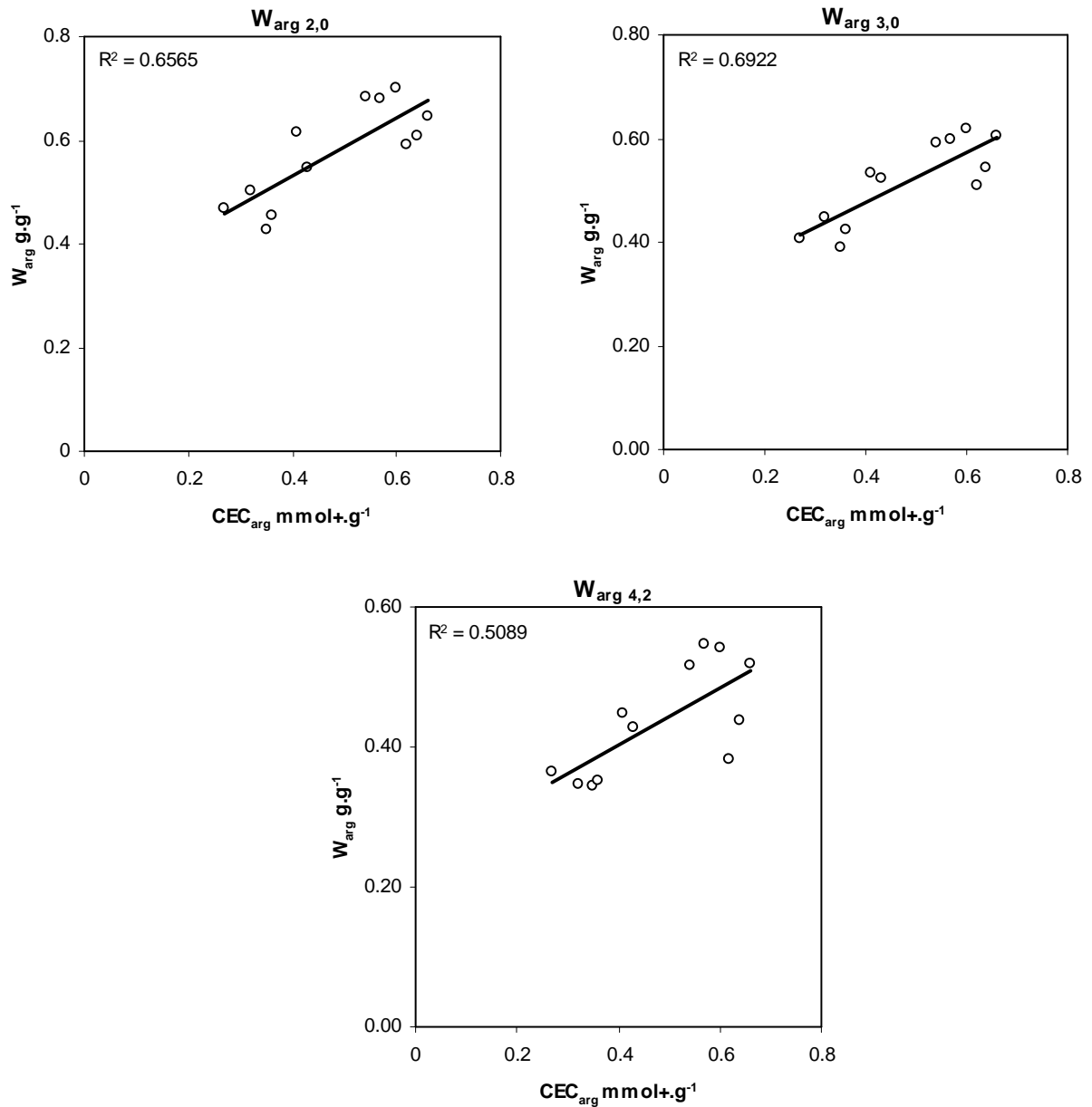


Figure 7.6 : Variance de la teneur en eau massique en fonction de la capacité d'échange cationique de l'argile à -100 hPa (a), -330 hPa (b) et -15000 hPa. (c).

Toujours selon Bruand et Tessier (2000), on peut distinguer trois groupes de sols argileux : des sols développés sur des matériaux parentaux sous consolidés (i.e. sols argileux développés sur des alluvions récentes ou matériaux de pente ne subissant pas de dessiccation poussée en raison de leur localisation), moyennement consolidés (i.e. sols argileux soumis aux cycles d'humectation - dessiccation dans des conditions « moyennes ») et sur-consolidés (i.e. sols argileux développés sur des sédiments argileux suffisamment peu altérés pour avoir conservé un état structural lié aux pressions de diagenèse) (Figure 7.7).

Les horizons appartenant au groupe des sols développés « sous consolidés » (groupe I) correspondent à des horizons pour lesquels $\Delta W_{arg} > 0,25 \text{ g.g}^{-1}$ (Figure 7.7a). Pour les horizons appartenant à des sols « moyennement consolidés » (groupe II), la différence de la teneur en eau est telle que $0,15 \leq \Delta W_{arg} \leq 0,25 \text{ g.g}^{-1}$ (Figure 7.7b). Enfin, pour les horizons appartenant à des sols « sur-consolidés » (groupe III), $\Delta W_{arg} < 0,15 \text{ g.g}^{-1}$ (Figure 7.7c).

L'analyse des résultats révèle que la plupart des horizons du groupe I appartient à des sols développés sur des sédiments alluviaux et colluviaux récents et sur des sédiments marins récents. Ces horizons ont été faiblement affectés par la dessiccation pendant la saison sèche en raison de la proximité d'eau libre tout au long de l'année (nappe alluviale, nappe perchée liée à la présence de mouillère). La courbe de rétention en eau traduit une rétention en eau élevée mais celle-ci se réduira dès lors qu'elle sera mobilisée puisque alors l'horizon conservera la mémoire de la contrainte hydrique correspondante. Il appartiendra alors au groupe II, voire au groupe III si la contrainte hydrique a été très élevée (Charpentier, 1991 ; Vasseur *et al.*, 1995 ; Bruand et Tessier, 2000). Au sein du groupe I, il existe cependant une variabilité élevée qui peut s'expliquer à la fois par l'histoire hydrique de l'horizon mais aussi par la minéralogie de l'argile.

Les horizons du groupe II appartiennent à des sols bien drainés et soumis à des réhumectations - dessiccations liées aux cycles saisonniers qui ont fait disparaître l'héritage du matériau dans lequel le sol s'est développé. Cet héritage peut être soit celui d'un matériau sur-consolidé (i.e. marnes), soit celui d'un matériau sous consolidé (i.e. sédiment récent ne subissant que très peu les cycles climatiques en raison de la présence d'une nappe temporaire).

Pour les horizons appartenant au groupe III, la différence de teneur en eau entre -10 hPa et -15000 hPa est plus faible ($\Delta W_{arg} < 0,15 \text{ g.g}^{-1}$) par rapport aux groupes I et II.

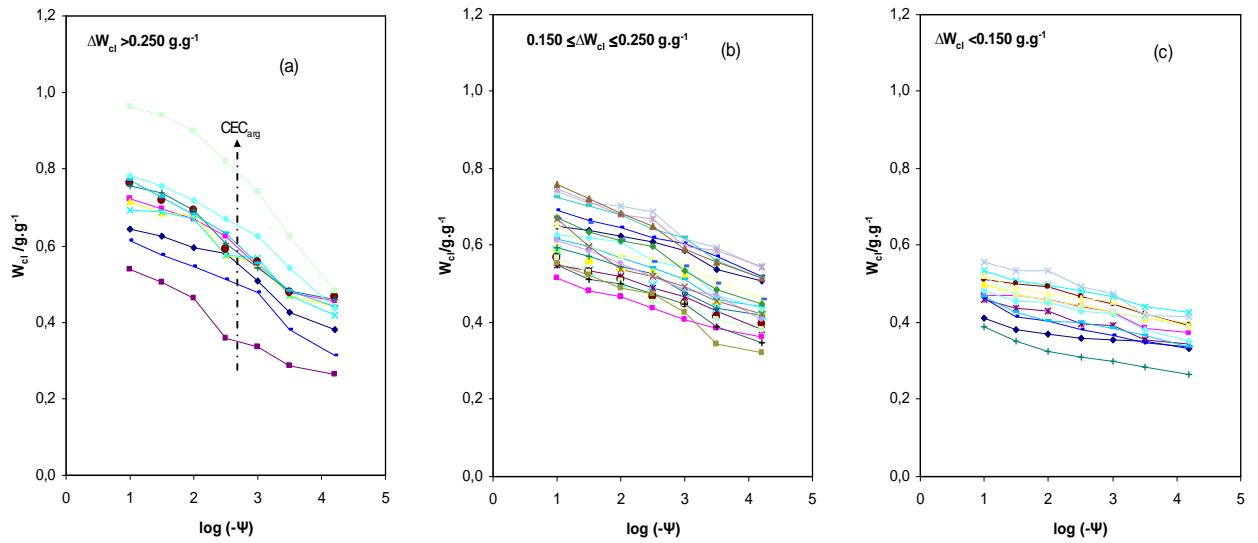


Figure 7.7 : Courbes de rétention en eau de l'argile (horizons de subsurface, n=46) regroupées en fonction de la différence de la teneur en eau rapportée à la masse d'argile entre -10 hPa et -15000 hPa.

Les horizons appartenant au groupe III sont pour la plupart des horizons appartenant à des sols très peu différenciés développés sur des matériaux sur-consolidés. Au sein d'un même profil de sol, ces horizons correspondent souvent aussi à des horizons C.

C. Minéralogie de la phase argileuse et propriétés de rétention en eau

Les diagrammes de poudre montre que la fraction < 2 μ m des 12 échantillons sélectionnés pour l'étude est composée quasi exclusivement de minéraux argileux 2 : 1 (raies 001 à 1,4-1,5 nm, 002 à 1,02 nm et 060 à 0,149-0,154 nm) et 1 : 1 (raies 001 à 0,718 nm et 060 à 0,149 nm), très secondairement de quartz (raies 100 à 0,425 nm et 101 à 0,334 nm) et d'oxy-hydroxydes (raies 110 à 0,418 nm et 116 à 0,170 nm) et de façon très marginale de minéraux feldspathiques (raies principales à 0,324 nm et 0,319 nm).

Les échantillons orientés magnésiens à l'état normal (équilibre humidité relative du laboratoire) montrent tous la présence de kaolinite (raie à 0,72 nm) et de minéraux argileux à espace interfoliaire non gonflant (raie à 1,02 nm) ou gonflant (raies à 1,47 nm, 1,57 nm, 1,73 nm). Après traitement à l'éthylène glycol et selon les échantillons, certains espaces interfoliaires qui étaient à l'origine des raies à 1,47 nm et 1,57 nm ou proches de ces valeurs passent à 1,7 nm à 1,8 nm indiquant par la même l'existence d'espaces interfoliaires de type smectite. Après chauffage à 300°C, l'ensemble des raies supérieures à 1,01 nm a disparu, indiquant la fermeture des espaces interfoliaires magnésiens à la suite de la perte de l'eau d'hydratation des cations interfoliaires. (Figure 7.8).

Pour certains horizons, la raie à 1,4 – 1,5 nm n'a pas été modifiée après traitement à l'éthylène glycol et se ferme après chauffage à 110 °C. Les minéraux argileux correspondant seraient alors de type vermiculite avec une charge conduisant à des espaces interfoliaires à une ou deux couches d'éthylène-glycol (Figure 7.9). Les minéraux dont la raie demeure proche de 1,02 nm après saturation à l'éthylène glycol sont de type illite (Figure 7.9).

Les minéraux argileux identifiés pour chacun des 12 échantillons sélectionnés sont grosso les mêmes mais en proportions qui peuvent être très différentes d'un horizon à l'autre (Tableau 7.4).

Dans le profil de Rébréchien et celui de St-Baudel où les sols se développent dans un matériau parental de type argile lourde (d'âge respectivement Oxfordien et Burdigalien), les minéraux argileux très largement dominants sont de type smectite, ceux de type illite et kaolinite étant très marginaux (Figure 7.8). Pour ces les horizons de ces deux profils, $0,15 \leq$

$\Delta W_{\text{arg}} \leq 0,25 \text{ g.g}^{-1}$. Donc, bien que les argiles de ces deux horizons soient très majoritairement smectitiques, la courbe de rétention en eau de leur phase argileuse est de type « moyennement consolidé », indiquant de la sorte que l'histoire des contraintes hydriques de la phase argileuse joue un rôle déterminant dans les propriétés de rétention en eau des sols argileux.

Pour les trois horizons Chaume 1-3, Chaume 1-4 et Donzy 1-3, $\Delta W_{\text{arg}} < 0,15 \text{ g.g}^{-1}$, indiquant qu'il s'agit d'horizons pour lesquels la phase argileuse est sur-consolidée. En revanche pour l'horizon Chaume 1-2, $\Delta W_{\text{arg}} = 0,21 \text{ g.g}^{-1}$ indiquant qu'il s'agit d'un horizon « moyennement consolidé ». Alors que les diagrammes de RX indiquent une minéralogie de l'argile très proche, les propriétés de rétention en eau sont différentes car l'histoire des contraintes hydrique est différente. L'horizon Chaume 1-2 ($\Delta W_{\text{arg}} = 0,21 \text{ g.g}^{-1}$) possède une phase argileuse dont la composition est très proche de celle des horizons sous jacents (Chaume 1-3 et Chaume 1-4) mais dont les propriétés de rétention en eau traduisent un état moins consolidé que dans les horizons sous jacents.

Enfin, les six derniers horizons ont une phase argileuse composée de minéraux argileux de type kaolinite, illite, vermiculite et smectite (Figure 7.10). Pour cinq de ces horizons, $0,20 \leq \Delta W_{\text{arg}} \leq 0,26 \text{ g.g}^{-1}$. Pour le sixième qui est l'horizon St-Quentin 1-3, $\Delta W_{\text{arg}} = 0,17 \text{ g.g}^{-1}$. Ainsi, non seulement comme précédemment des horizons de minéralogie très proche ont des propriétés de rétention en eau très différentes, mais des phases argileuses composées de minéraux argileux moins gonflants (Chaume 1-3, Chaume 1-4 et Donzy 1-3) que pour d'autres (Rébréchien 1-3 et St Baudel 2-2) retiennent en fait moins d'eau que les secondes en raison de leur histoire hydrique.

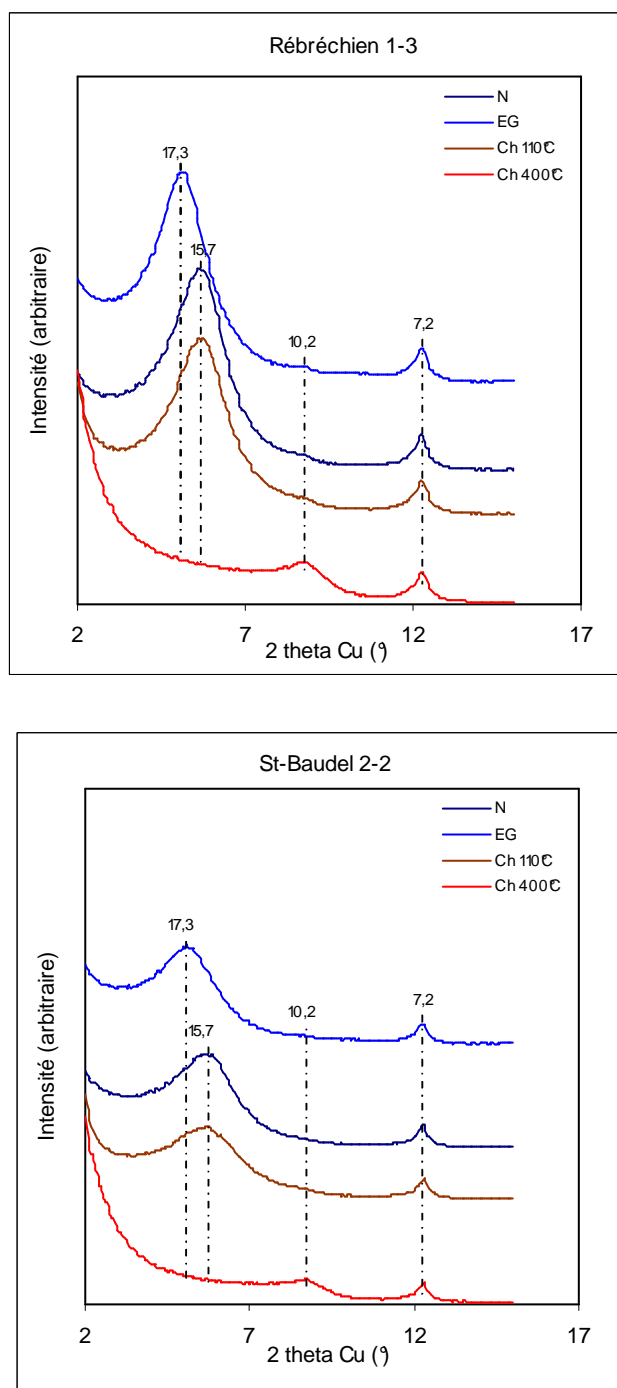


Figure 7.8 : Diagramme de diffraction des rayons X des dépôts orientés pour deux échantillons (Rébréchien 1-3 et St-Baudel 2-2).

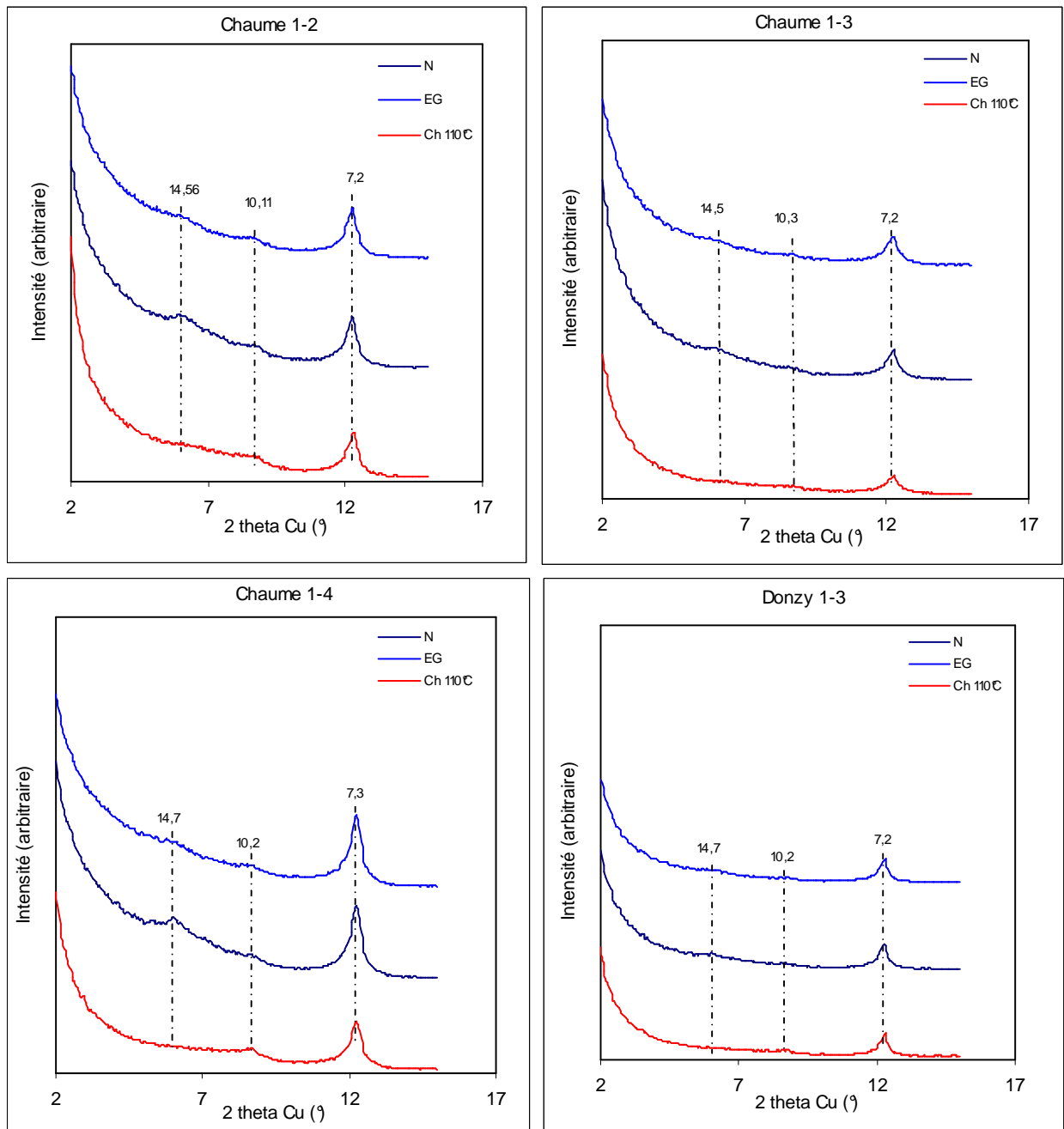


Figure 7.9 : Diagramme de diffraction des rayons X des dépôts orientés pour quatre échantillons (Chaume 1-2, 1-3, 1-4 et Donzy 1-3).

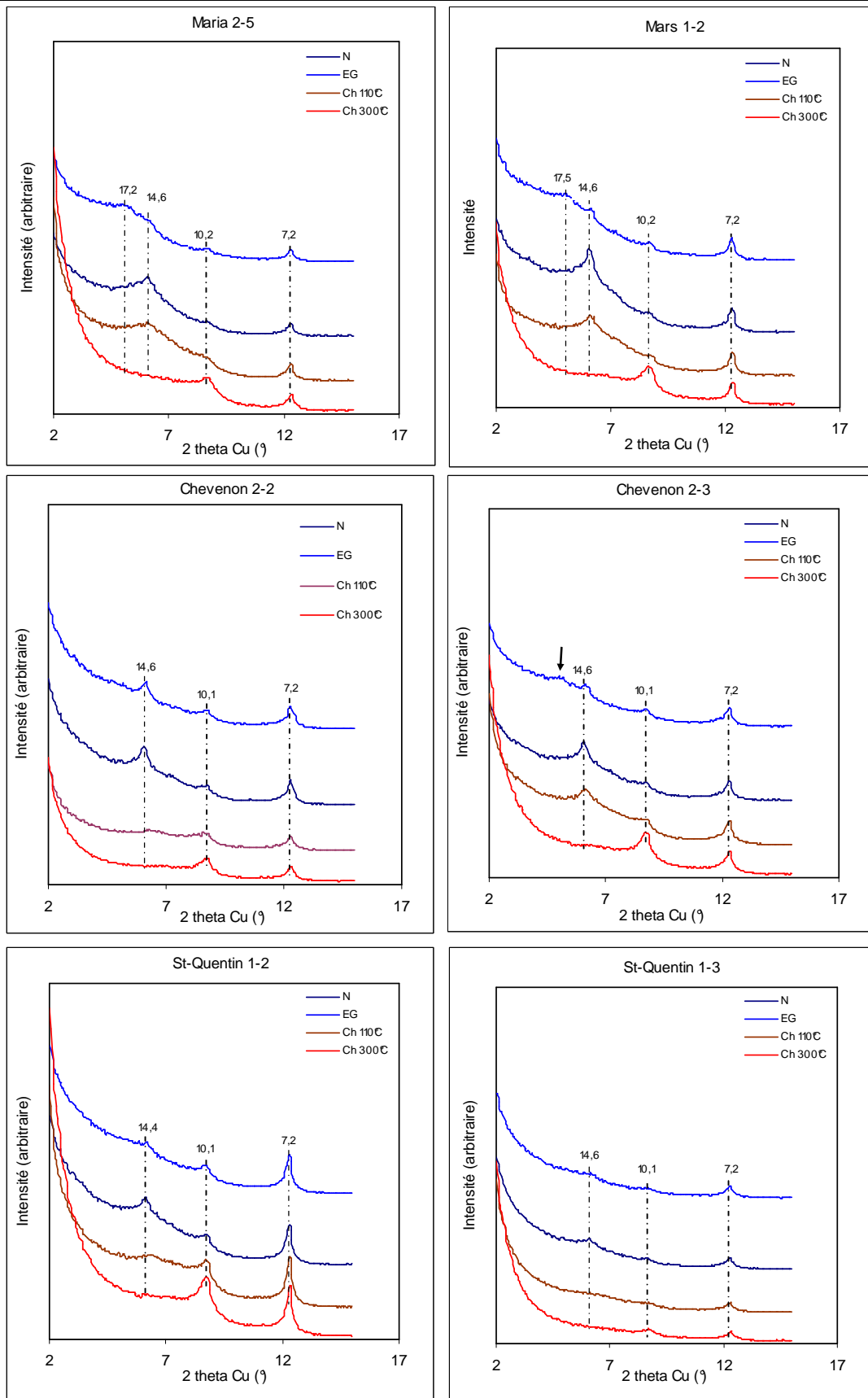


Figure 7.10 : Diagramme de diffraction des rayons X des dépôts orientés pour quatre échantillons (Maria 2-5, Mars 1-2, Chevenon 2-2, 2-3, St-Quentin 1-2 et 1-3).

Chapitre VII : Étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux, rôle de l'état structural et de la minéralogie de la phase argileuse

Tableau 7.4 : Evaluation semi-quantitative des minéraux argileux identifiés par DRX.

Profils	Horizons	Profondeur (cm)	Minéraux argileux					CEC _{arg} mmol ₊ .g ⁻¹
			Kaolinite	Illite	Smectite	Vermiculite	Interstratifié	
Rébréchien	B	42-52	++	+	+++			0,64
St-Baudel	C	28-38	+	+	+++			0,66
Chaume	B	42-52	++	+		+		0,32
	B	68-78	++	+		+		0,36
	C	105-115	++	+		+		0,35
Donzy	B	67-77	++	+		+		0,27
Maria	C	100-110	+	+	traces	++	+	0,62
Mars	B	42-52	+	+	traces	++	+	0,60
St-Quentin	B	35-45	++	++	traces	++		0,41
	B	70-80	+	+	traces	+		0,43
Chevenon	C	50-60	++	+	traces	++	+	0,54
	C	90-100	++	++	traces	++	+	0,57

+++ Abondant, ++ moyennement abondant, + peu abondant.

IV. CONCLUSION

Nous avons pour objectif d'analyser les propriétés de rétention en eau des sols argileux et de discuter en particulier les rôles respectifs de la quantité d'argile, de sa nature minéralogique, de son état structural (mode d'assemblage des particules élémentaires d'argile) et de l'histoire des contraintes hydriques.

Nos résultats montrent que les propriétés de rétention en eau peuvent s'expliquer par les différences de teneur en argile et de mode d'assemblage des particules composant la phase argileuse. Si la teneur en argile est estimée à l'aide de la teneur en fraction $<2 \mu\text{m}$, le mode d'assemblage des particules d'argile peut être quantifié à l'aide du volume poral développé par cet assemblage.

L'analyse des variations du volume poral développé par la phase argileuse a montré qu'il était lié à la capacité d'échange cationique de cette phase argileuse. En revanche, ce volume poral n'est pas apparu lié à la minéralogie des argiles telle que l'on peut la décrire à l'aide de la diffraction des RX. L'analyse détaillée des minéraux argileux a montré que l'histoire des contraintes hydrique apparaît être plus déterminante pour les propriétés de rétention en eau que la minéralogie des argiles.