



Mineralogy and charge of Moroccan vertisols smectite

Yamina Moujahid¹, Rachid Bouabid²

¹ *Unité de Recherche Gestion Durable des Ressources Naturelles, Centre Régional de la Recherche Agronomique, B.P. 578, Meknès, Maroc.*

² *Département des Sciences du Sol, Ecole Nationale d'Agriculture, Meknès,*

* Corresponding author. E mail: moujahidy@yahoo.fr, Tel: 0679668168

Abstract

In this study, the clayey fractions from vertisols of five major agricultural regions of Morocco, the Chaouia, the Gharb, the Zaërs, the Doukkala and the Saïs were studied. A reference smectite, the Wyoming montmorillonite (SWY-1) was used for comparison. X-ray diffraction on samples subjected to Mg and K saturations, as well as solvations using ethylene glycol and heating to 550°C allowed the identification and the semi quantification of the mineral species constituting the clay fraction. The interlayer charge of the 2:1 clays was estimated by the method of intercalation by the alkylammonium chains. CEC was also determined before and after saturation with lithium and heating to determine total CEC and tetrahedral CEC. The results showed that the clayey fractions of the five Moroccan vertisols studied are essentially constituted of smectites associated to variable, but often weak amounts of illite, kaolinite, chlorite, quartz and feldspars. The smectites of the vertisols of the Chaouia and the Zaër are beidellitic, while those of the Gharb, Saïs and Doukkalas are mixed beidellite and montmorillonite. The alkylammonium method revealed that the interlayer charge of the smectites varied between 0.57 mol(c) for the vertisol of the Chaouia and 0.36 mole(c) for that of the Doukkala. The total, octahedral and tetrahedral CECs were in agreement with the charge determined by the alkylammoniums. The clayey fractions studied presented high total CEC, varying from 85,3 and 108,5 cmole+/kg and varying tetrahedral CEC ranging from 45,8 and 76,4 mole(c)/kg, reflecting the nature of the smectites (beidellite vs. mixed beidellite-montmorillonite) in clay mineralogy of each soil.

Key words: Vertisols, Smectite, Beidellite, Montmorillonite, Charge, Alkylammonium ion

Minéralogie et charge des smectites de Vertisols Marocains

Résumé

L'étude par diffraction des rayons X associée aux traitements de saturation au Mg et K, solvatisation à l'éthylène glycol et au chauffage à 550°C a permis l'identification et la semi-quantification des espèces argileuses constituant les vertisols de cinq grandes régions agricoles du Maroc, la Chaouia, le Gharb, les Zaër, les Doukkala et le Saïs. La charge permanente des argiles 2:1 dioctaédriques gonflantes a été déterminée par la méthode d'intercalation aux ions alkylammoniums et par la mesure des capacités d'échange cationique (CEC) avant et après saturation au lithium (CEC totale et tétraédrique). Les fractions argileuses des vertisols étudiés sont constituées essentiellement de smectites associées, à des teneurs variables mais souvent faibles, d'illite, de kaolinite, de chlorite, de quartz et de feldspaths. Les smectites des vertisols de la Chaouia et des Zaër sont de type beidellitique, celles des vertisols du Gharb, du Saïs et des Doukkala sont des mélanges de beidellite et de montmorillonite. Ces fractions argileuses présentent des capacités d'échange cationique totales élevées, variant entre 85,3 et 108,5 cmole(-)/kg. Les capacités d'échange cationique d'origine tétraédrique des argiles varient entre 45,8 et 76,4 cmole(-)/kg. La charge de la fraction smectitique varie entre 0,57 mole (-) par demi maille pour le vertisol de la Chaouia et 0,36 mole (-) par demi maille pour celle du vertisol des Doukkala. Les mesures de la CEC totale et de la CEC tétraédrique sont en accord avec les charges interfoliaires mesurées.

Mots clés : Vertisol, Smectite, Beidellite, Montmorillonite, Charge, alkylammonium

1. Introduction

Dans les régions méditerranéennes arides et semi arides, [1] les vertisols sont ubiquistes et couvrent une superficie d'environ 1,5 millions d'hectares sur des matériaux argileux situés généralement dans des dépressions topographiques. Leur composition minéralogique est dominée par des argiles gonflantes [2-3] souvent assimilées à des montmorillonites [4-5]. Les vertisols ou « Tirs » au Maroc, sont des sols à argiles gonflantes ayant une couleur généralement foncée, rougeâtre dans les régions drainées et grisâtre dans les régions peu drainées ou hydromorphes.

Par leurs caractéristiques minéralogiques et chimiques, les argiles gonflantes confèrent à ces sols des propriétés physiques et chimiques de grande importance dans la dynamique de l'eau et la biodisponibilité des éléments nutritifs aux plantes [6-7-8-9] ainsi que dans les processus d'adsorption des molécules organiques. La compréhension du comportement des sols «Tirs» vis-à-vis de l'eau et des éléments minéraux est tributaire d'une bonne connaissance de la composition minéralogique de leurs argiles [10], en particulier la détermination de la charge totale et de son origine.

Suivant la distribution relative de la charge dans les couches tétraédriques et octaédriques, deux types de smectites dioctaédriques peuvent être distingués [11-12], la montmorillonite dont la charge est localisée essentiellement dans les couches octaédriques (>50%) et la beidellite dont la charge est localisée en majorité (> 50%) dans les couches tétraédriques. Ces deux types de smectites ont des propriétés et des comportements différents, surtout lorsqu'il s'agit de phénomènes de fixation-libération ou d'échange de cations tels que le potassium, l'ammonium, le calcium et le magnésium [13-14-15-16-17]. Il est donc important de préciser la nature de la smectite qui existe dans les sols comportant ce type d'argile. Le test au lithium, la méthode d'intercalation des ions alkylammoniums et la détermination de la capacité d'échange cationique totale et tétraédrique sont des méthodes complémentaires qui permettraient cette caractérisation.

Ainsi, cette étude a pour objectifs (i) l'identification et la quantification des différentes espèces minérales des vertisols de cinq régions agricoles du Maroc, (ii) estimation de la charge (totale et tétraédrique) des fractions argileuses par la mesure de la capacité d'échange cationique (CEC) avant et après saturation au lithium, et (iii) évaluation de la charge interfoliaire des smectites par la méthode d'intercalation aux ions alkylammoniums.

2. Matériel et méthodes

2.1. Les sols étudiés

Cinq Vertisols représentatifs des grandes régions agricoles du Maroc, Chaouia, Gharb, Doukkala, Zaër et Saïs ont été échantillonnés (figure 1). Une smectite de référence, la montmorillonite du Wyoming (SWY-1) dont les caractéristiques et les propriétés sont connues (Clays Mineral Society) a été sélectionnée à titre de comparaison. L'étude a porté seulement sur les fractions argileuses (< 2 μ m) des sols choisis.



Figure 1 : Localisation des sols étudiés

2.2 Techniques utilisées

Séparation de la fraction argileuse des sols : Les sols étudiés ont été séchés à température ambiante, broyés et tamisés à 2mm. Les carbonates ont été éliminés à l'acétate de sodium (1M, ajusté à pH 5 avec l'acide acétique) sous une température comprise entre 60°C et 80°C [18]. La matière organique a été éliminée par attaque à l'eau oxygénée et les oxydes et hydroxydes de fer ont été éliminés au citrate-bicarbonate-dithionite [19]. Après dispersion des suspensions au métaphosphate de sodium et agitation pendant 12 heures, les sables ont été séparés par tamisage humide. Les argiles ont été séparées des limons par une série de sédimentation selon la loi de Stokes [20].

Etude minéralogique des argiles : Les suspensions argileuses ont été saturées au magnésium et au potassium par des solutions (0,5M) de $MgCl_2$ et (1M) de KCl respectivement, déposées sur trois lames de verre, la première a été séchée à l'air, la seconde a été solvatée à l'éthylène glycol et la troisième a été chauffée à 550°C pendant deux heures. Les lames ont été analysées par un diffractomètre de rayons X (model RIGKU) à radiation du type $K\alpha$ -cuivre. La vitesse de diffraction est de 2° 2θ /min. L'interprétation des spectres obtenus a été faite par comparaison des distances réticulaires (d_{001}) des raies obtenues, avec celles des minéraux argileux et non argileux de références.

La méthode d'intercalation des ions alkylammoniums a été utilisée pour l'estimation de la charge interfoliaire des smectites [21-22]. Les molécules d'alkylammoniums sont préparés par réaction des alkylamines de formule $C_nH_{2n+1}-NH_2$, avec n variant de 6 à 18, avec de l'acide chlorhydrique (1M) jusqu'à l'obtention d'un pH = 6,5 dans un bain marie à 65°C selon la réaction la réaction : $C_nH_{2n+1}-NH_2 + HCl \rightarrow C_nH_{2n+1}-NH_3^+ + Cl^-$. Les concentrations des solutions d'alkylamines utilisées sont : (2M) pour n = 6, (0,5M) pour n = 7 à 9, (0,1M) pour n = 10 à 15 et (0,05M) pour n = 16 à 18. Ensuite, 5 ml de la solution d'alkylammonium (n = 6 à 18) est ajoutée à une suspension contenant 50 mg d'argile saturée au Na. Les suspensions sont incubées à 65°C pendant 24 h avec agitation régulière. La réaction d'intercalation est la suivante : $Argile-Na + C_nH_{2n+1}-NH_3^+ \rightarrow Argile-NH_3-C_nH_{2n+1} + Na^+$. L'excès des sels d'alkylammoniums est éliminé par cinq lavages à l'éthanol. Les suspensions subissent une agitation ultrasonique à la suite du premier lavage pour avoir une bonne dispersion. Après le premier lavage, quelques ml d'eau distillée sont ajoutés à l'argile. Les suspensions sont placées au bain-marie pendant 20 min à 40°C pour permettre une évaporation rapide de l'éthanol. Les lames orientées sont séchées à l'air libre, puis conservées sous vide avant l'analyse par diffraction des rayons X. La charge est déterminée à partir de la représentation de la variation de la distance réticulaire d_{001} en fonction du nombre (n) de carbone dans l'ion alkylammonium.

Détermination de la capacité d'échange cationique totale et tétraédrique des fractions argileuses : La capacité d'échange cationique totale des argiles a été déterminée par saturation de 0,5 g d'argile sèche avec trois fois 30 ml d'acétate de sodium 1M et 0,01M. Ensuite, quatre lavages à l'éthanol ont été effectués (avec 30 ml) pour éliminer l'excès de sel. L'échange du sodium (Na^+) adsorbé a été fait à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium 1M (Na^+ est remplacé par NH_4^+). Le sodium extrait est mesuré par spectrophotométrie d'absorption atomique. La capacité d'échange cationique (CEC) est exprimée en cmole (+) /kg d'argile sèche (équivalent au méq/100g).

Les smectites dioctaédriques à charges octaédriques (les montmorillonites) et tétraédriques ont été distinguées par le test d'Hofmann et Klemen (1950).

La capacité d'échange cationique d'origine tétraédrique est déterminée en trois étapes: d'abord, une neutralisation des charges octaédriques par saturation avec trois fois 30 ml de solution de LiCl 1M. Ensuite, un chauffage à 300°C pendant 16 h et enfin, une saturation par trois fois 30 ml de solution d'acétate de Na 1M. Après lavage des sels solubles en excès, le sodium retenu par les charges tétraédriques des smectites est échangé par trois fois 30 ml de solution d'acétate d'ammonium 1M et analysé par spectrophotométrie d'absorption atomique.

3. Résultats et discussion

3.1. Détermination minéralogique qualitative et semi-quantitative de la fraction argileuse des vertisols des cinq régions étudiées

Les diffractogrammes des fractions argileuses des sols et de l'argile de référence, saturées au Mg, orientées et séchées à l'air ambiant présentent une raie très intense entre 1,4 et 1,5 nm caractéristique des smectites (figures

2-6). Après saturation à l'éthylène glycol, il y a gonflement de la smectite, qui se traduit par l'apparition d'une raie à 1,7 nm. Enfin, le traitement à 550°C montre un pic à 1nm qui augmente d'intensité.

Les raies correspondantes aux smectites sont généralement larges et asymétriques, suite à leur faible état de cristallisation et à la présence d'espacements interréticulaires variables. La raie apparaissant dans les spectres à 0,72 nm, est caractéristique de la kaolinite (minéral en général bien cristallisé). Cette raie diminue d'intensité après le traitement à l'éthylène glycol puis disparaît après chauffage à 550°C. La présence de la chlorite est indiquée par la persistance de la raie à 1,4 nm après les trois traitements et par la présence d'un pic d(004) assez bien marquée à 0,353 nm. Les raies apparaissant à 0,426 nm et 0,32 nm sont caractéristiques respectivement du quartz et des feldspaths.

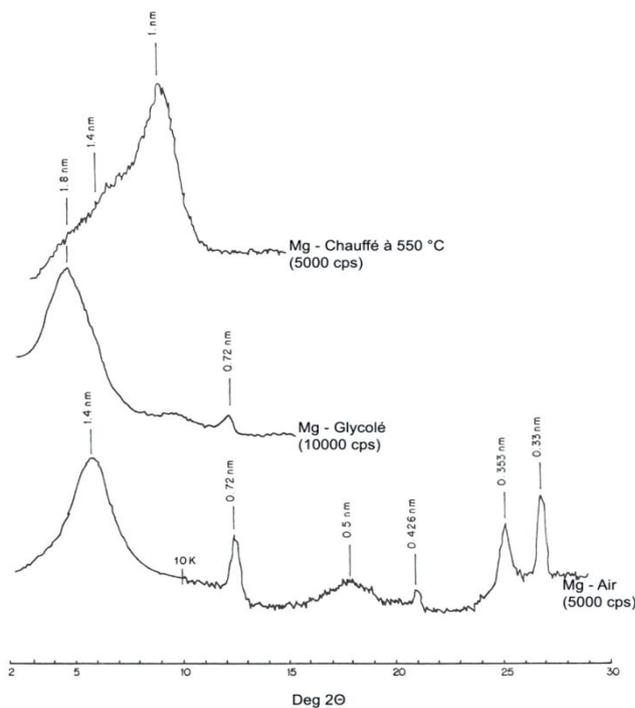


Figure 2 : Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse du vertisol de la Chaouia

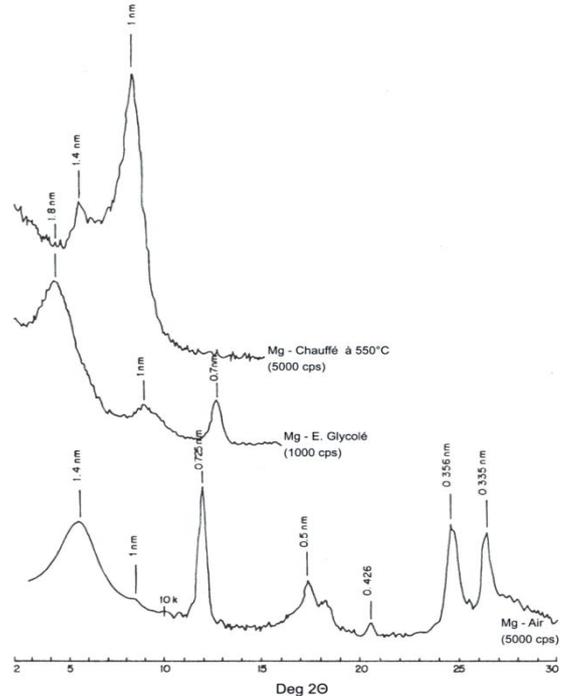


Figure 3 : Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse du vertisol du Gharb

La semi-quantification de la composition des minéraux argileux a été effectuée sur les tests à l'éthylène glycol. Pour les smectites, il y aurait, au vu des spectres de diffraction, une amélioration apparente de la cristallinité après ce traitement par suite d'une répartition régulière des molécules d'éthylène glycol entre les feuillets argileux. Les surfaces intégrées des raies ont été planimétrées par rapport à la ligne du bruit de fond. Puisque les valeurs obtenues sont approximatives (erreur pouvant excéder 10%), les résultats sont présentés en classes d'abondance au lieu de chiffres absolus. Les résultats de cette semi-quantification sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Composition minéralogique des fractions argileuses de cinq vertisols Marocains. Semi quantification basée sur l'intensité intégrée des pics de diffraction X

Echantillon	Smectite	Illite	Kaolinite	Chlorite	Quartz	Feldspaths
Chaouia	++++	-	+	T	T	-
Gharb	++++	+	++	+	T	-
Saïs	++++	T	+	T	T	-
Doukkala	++++	+	T	T	T	T
Zaër	++++	+	T	T	T	T
SWY1	100 %	-	-	-	-	-

++++ > 60 % ; ++ (15 – 30) % ; + (5 – 10) % ; T < 5 % et - 0 %

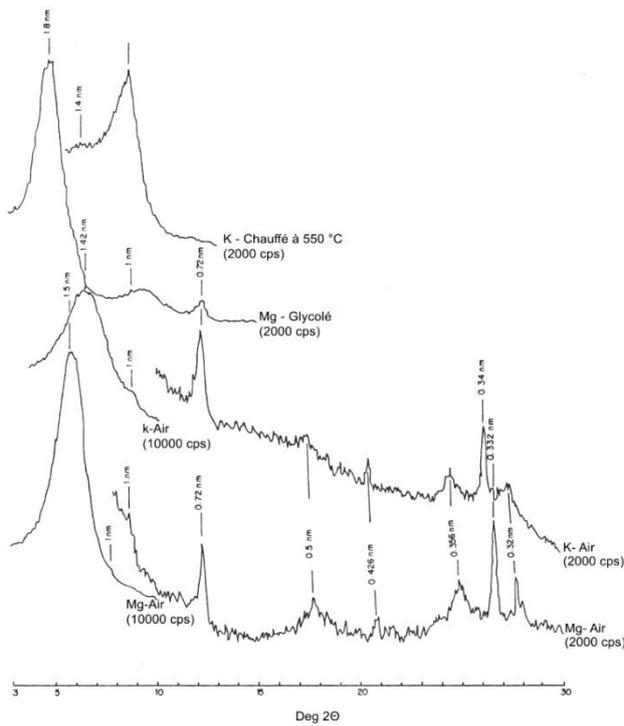


Figure 4 : Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse du vertisol de Zaër

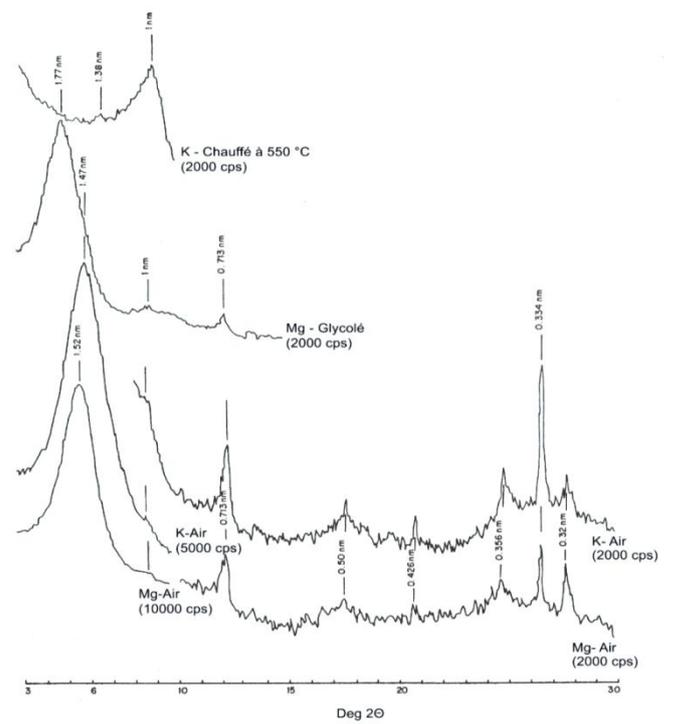


Figure 5 : Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse du vertisol du Doukkala

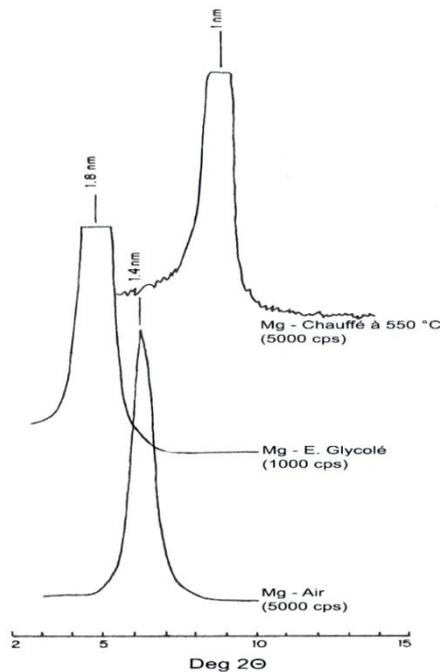


Figure 6 : Diffractogrammes de rayons X de l'argile de référence (SWY-1)

Les résultats montrent que les fractions argileuses des Vertisols étudiés sont riches en smectites. L'illite est présente en faible quantité (5-15 %) dans les argiles des sols du Gharb, Doukkala et Zaër et en trace (< 5%) dans celles du sol du Saïs. La kaolinite se trouve en quantité assez importante (15-30 %) dans le vertisol du Gharb, en faible teneur (5-15 %) dans les vertisols de la Chaouia et du Saïs et en trace dans les vertisols des Doukkala et des Zaër. La chlorite apparaît en faible quantité (5-15 %) dans le sol du Gharb et en trace dans les sols de la Chaouia, du Saïs, des Doukkala et des Zaër. Les vertisols étudiés contiennent également des traces de quartz.

Des traces de feldspaths existent dans les vertisols des Doukkala et des Zaër. Schoen (1969) a rapporté que les fractions argileuses des tirs marocains sont dominées par des montmorillonites. Bouabid (1987) a rapporté des résultats similaires pour les vertisols du Gharb, de la Chaouia et du Saïs.

3.2. Nature des argiles gonflantes

La succession des réactions de saturation au lithium, de chauffage à 300°C, de solvatation au glycérol et d'analyse par diffraction des rayons-X des argiles des vertisols des Zaër et des Doukkala a permis l'obtention des diffractogrammes présentés dans la figure 7. La raie située à 1,76 nm est caractéristique de la beidellite (smectite à charge surtout tétraédrique). Ces raies montrent que les smectites des deux vertisols du Zaër et Doukkala sont des mélanges de beidellite et de montmorillonite avec une proportion assez élevée de la beidellite dans l'argile du Zaër. (Figure 7).

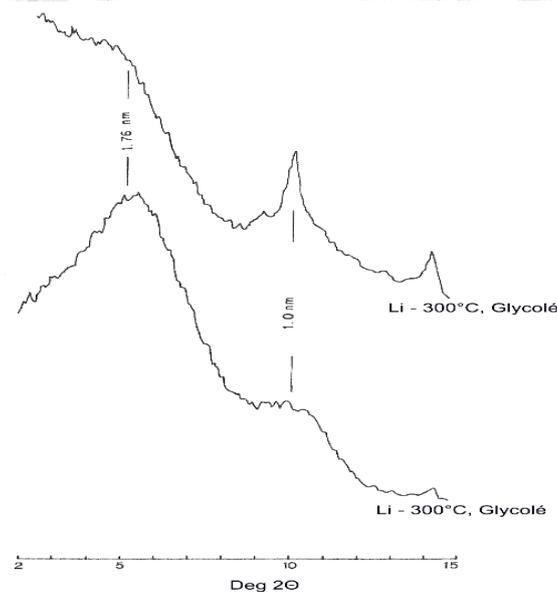


Figure 7 : Diffractogrammes de rayons X des argiles de vertisol des Zaër et des Doukkala saturées au Li, chauffées à 300°C et solvatées au glycol.

La smectite du vertisol de la Chaouia est de type beidellitique, alors que les smectites des vertisols du Gharb, Zaër, Doukkala et Saïs sont des mélanges de montmorillonite et de beidellite en proportions différentes (tableau 2).

Tableau 2 : CEC totale, CEC tétraédrique et % de la CEC tétraédrique par rapport à la CEC totale des argiles étudiées et type de smectite, beidellite (B) ou montmorillonite (M).

Echantillon	Chaouia	Zaër	Gharb	Saïs	Doukkala	SWY-1
CEC totale (cmole+/kg)	108,5	102,2	94,3	91,6	85,3	90,4
CEC tétraédrique (cmole+/kg)	76,4	70,6	50,8	56,3	45,8	30,1
% CEC tétraédrique	70,4	69,1	53,9	61,4	53,7	33,3
Type de smectite	B	B+M	B+M	B+M	B+M	M

L'analyse par diffraction des rayons X des complexes argile-alkylammoniums a permis l'estimation de la charge interfoliaire des smectites. La figure 8 présente les diffractogrammes de rayons-X correspondant à la variation de la distance d_{001} (nm) de la fraction argileuse du sol de Doukkala en fonction du nombre de carbone des chaînes des ions alkylammoniums (Figure 8).

Ces diffractogrammes présentent tous deux raies à 0,715 nm et 1 nm correspondant respectivement à la Kaolinite et l'illite. La raie intense qui apparaît à 1,34 nm ou 1,35 nm est caractéristique des smectites, avec un nombre de carbone compris entre 6 et 8. Lorsque le nombre de carbone est supérieur à 10, les raies caractéristiques des smectites sont dédoublées, une apparaît au voisinage de 1,4 nm et l'autre plus loin entre 1,6 nm et 2,94 nm environ en fonction du nombre de carbone dans la chaîne alkylamine.

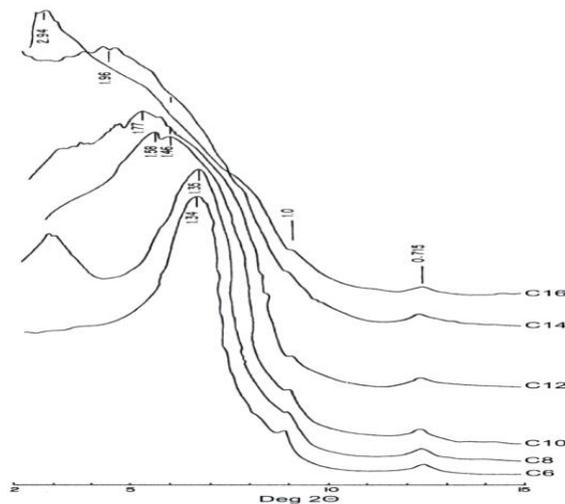


Figure 8 : Diffractogrammes de rayons X des argiles du sol de Doukkala après une intercalation aux alkylammoniums

La figure 9 présente la variation de la distance réticulaire d_{001} (nm) de la phase gonflante du sol de Doukkala en fonction du nombre de carbone des chaînes d'alkylammoniums (nc). (Figure 9)

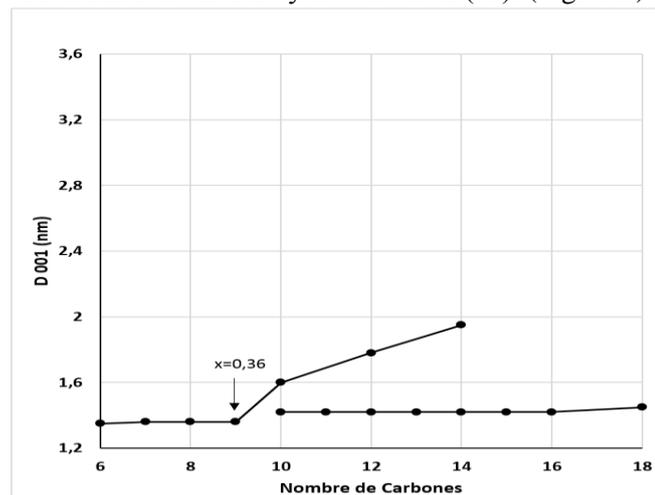


Figure 9. Tracé de la distance réticulaire d_{001} de l'argile des Doukkala en fonction du nombre de carbone des chaînes d'alkylammoniums.

Cette figure reproduit le comportement de la smectite vis-à-vis de l'intercalation : un d_{001} constant égale à 1,35 nm pour $6 \leq nc < 9$ puis deux réflexions d_{001} à $nc \geq 10$ dont l'une à 1,46 nm et l'autre croissante entre 1,58 nm et 1,96 nm. Le palier situé à 1,34 nm pour $6 \leq nc \leq 9$ correspond à l'intercalation d'une monocouche d'alkylammonium. La transition monocouche –bicouche a eu lieu pour $nc = 9$. Le calcul de la charge peut être effectué grâce à la formule de Lagaly et Weiss (1969) :

$$Charge = \frac{\left(\frac{p}{2}\right) \cdot 46,5}{1,26 \cdot 4,5 \cdot nc + 14}$$

Où p : nombre de couches d'alkylammoniums intercalées

nc : nombre de carbones de la chaîne d'alkylammonium utilisée

Ainsi, avec $P = 1$ et $nc = 9$ nous obtenons une charge interfoliaire de 0,36 mole(-).

A partir de $nc = 9$, la fraction argileuse a présenté deux comportements différents : le premier correspond à un palier à 1,46 nm qui s'étend de $nc = 10$ à $nc = 18$ caractéristique d'une phase argileuse de faible charge, qui peut être attribuée à la montmorillonite. Le deuxième comportement correspondant à des réflexions d_{001} élevées,

pouvant être relié à une phase argileuse à charge élevée telle que la beidellite. Cette interprétation est supportée par le résultat du test au lithium qui confirme la présence d'un mélange de beidellite et de montmorillonite dans la fraction argileuse de ce sol. Pour C₁₂ on a une distance réticulaire d₀₀₁ égale à 1,77 nm. Elle prend une valeur égale à 1,96 nm pour C₁₄. Toutefois, on ne constate pas de palier correspondant à une bicouche.

La variation de la distance réticulaire d₀₀₁ de la fraction argileuse du vertisol de Zaër en fonction de la longueur des chaînes d'alkylammoniums est présentée dans la figure 10. Tous les spectres présentent un pic à 0,713 nm correspondant à la kaolinite et un pic à 1 nm correspondant à l'illite. On peut remarquer que lorsque la longueur des chaînes d'alkylammoniums augmente, les raies correspondant aux smectites se déplacent vers les grandes distances réticulaires (figure 10).

Le tracé de la distance réticulaire d₀₀₁(nm) en fonction du nombre de carbone des chaînes d'alkylammoniums (figure 11) présente un début de formation d'une bicouche pour nc=6 et un palier entre nc = 8 et 11 à d₀₀₁ = 1,77 nm correspondant à la bicouche. La phase smectitique de l'argile de ce sol présente une certaine hétérogénéité de la densité de charge qui est expliquée par une transition assez large entre la monocouche et la bicouche (C₆ à C₈). A partir de C₁₁ on a une transition rapide vers la structure en pseudo-tricouche (2,2 nm et 2,3 nm). A partir de C₁₄, la distance réticulaire croît très rapidement jusqu'à atteindre 3,5 nm.(figure 11).

Le calcul de la charge peut être fait de deux façons :

- A partir d'une transition bien définie de la monocouche à la bicouche, nous pouvons calculer la charge maximale au point où débute la transition et la charge minimale au point correspondant au début du palier de la bicouche. La charge effective est la moyenne des charges maximale et minimale. La formule permettant le calcul de la charge citée précédemment donne (avec P=1) des charges de 0,48 mole(-) pour nc = 6 et 0,39 mole(-) par demi maille pour nc = 8. La moyenne étant de 0,44 mole(-) par demi maille.
- A partir de la bicouche, ou au point où débute la deuxième transition vers une pseudo-tricouche, Avec P = 2 et nc = 11, on obtient une charge de 0,61 mole(-) par demi maille.

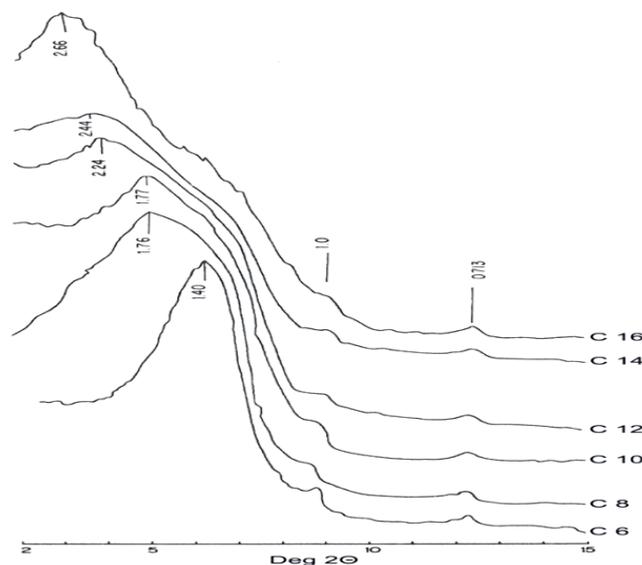


Figure 10 : Diffractogrammes de rayons X de la fraction argileuse du vertisol des Zaër après intercalation à des alkylammoniums.

La charge calculée à partir de la bicouche est plus grande que celle calculée à partir de la transition de la monocouche à la bicouche. Lorsqu'il s'agit d'argile hautement chargée (beidellite et vermiculite) c'est la charge qui est calculée à partir de la seconde transition (bicouche-pseudotricouche) qui doit être retenue [25]. Dans le cas des argiles montmorillonitiques (à charge faible), c'est la charge obtenue à partir de la première transition qui doit être considérée. L'argile du sol du Zaër, correspondant à un mélange de beidellite et de montmorillonite avec une proportion assez importante de la beidellite (test au lithium), a présenté une charge interfoliaire comparable à celle du vertisol du Gharb et légèrement plus élevée que celle du vertisol des Doukkala (tableau

3). La différence entre la charge maximale et minimale (calculée à partir de la transition bi-pseudotricouche) explique la grande hétérogénéité de la charge au sein des smectites des vertisols de la Chaouia, Gharb et Zaër. (tableau 3).

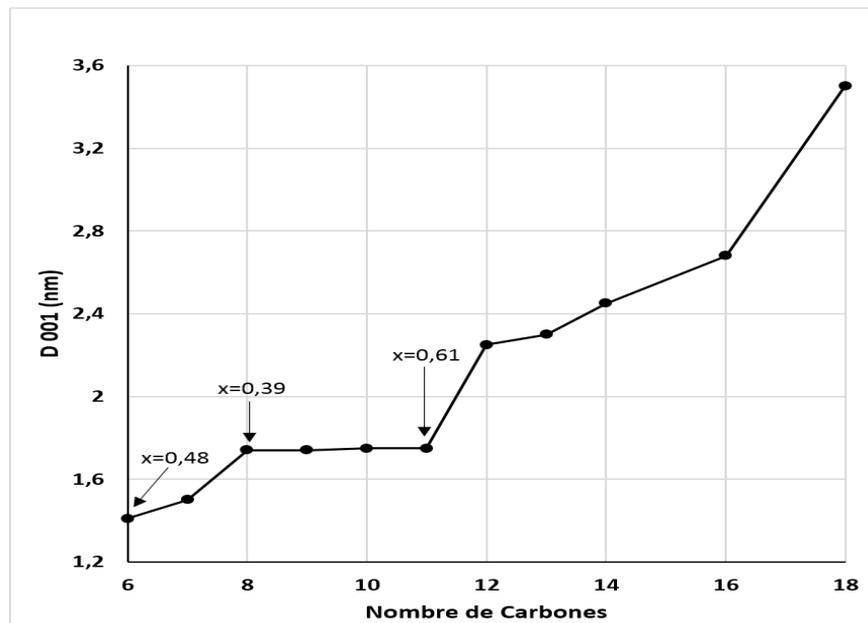


Figure 11 : Tracé de la distance réticulaire d_{001} en fonction du nombre de carbone des chaînes d'alkylammoniums de l'argile de Zaër.

Tableau 3 : Charges totale en mole (-) par demi-maille, déterminées par la méthode des Alkylammoniums, des fractions argileuses $< 2\mu\text{m}$ des vertisols étudiés

Origine	Couche Intégrale	Heterogeneité			Transition
		Xmax	Xmin	Xmoyen	
Chaouia [23]		0,66	0,47	0,57	bi/pseudotricouche mono/bicouche
		0,55	0,36	0,46	
Gharb [24]	0,61	0,54	0,36	0,45	Bicouche mono/bicouche
Saïs [24]	0,66				bicouche
	0,39				monocouche
Doukkala	0,36				monocouche
Zaër	0,61	0,48	0,39	0,44	Bicouche mono/bicouche

3.3. Détermination de la capacité d'échange cationique des argiles étudiées

Les résultats de la mesure des capacités d'échange cationique (CEC) totales et tétraédriques des fractions argileuses des vertisols étudiés et de la montmorillonite SWY1 sont reportés dans le tableau 2. Les argiles de sols de la Chaouia, du Zaër, du Gharb et du Saïs ont présentés des CEC-totales supérieures à celle de la montmorillonite SWY-1. La fraction argileuse du sol de Doukkala a donné la CEC totale la plus faible. La fraction argileuse du sol de la Chaouia a donné les CEC totale et tétraédrique et le pourcentage de CEC tétraédrique les plus élevés ; ceci est attribué à la nature beidellitique de ses smectites. La montmorillonite de Wyoming (SWY-1) a présenté la CEC tétraédrique et le pourcentage de CEC tétraédrique les plus faibles. Les argiles de sols du Zaër, Gharb, Saïs et Doukkala qui sont des mélanges de beidellite et de montmorillonite ont présenté des CEC tétraédriques et des pourcentages de CEC tétraédrique intermédiaires. Cependant, la smectite du vertisol de Zaër présente les caractéristiques de charge proche de celles du vertisol de la Chaouia. Les smectites du vertisol de la Chaouia présentent la charge la plus élevée, contrairement à celles des vertisols des Doukkala qui manifestent la charge la plus faible.

Ainsi, les charges déterminées par la mesure de la capacité d'échange cationique totale et tétraédrique viennent confirmer les résultats obtenus par le test au lithium et l'intercalation des ions alkylammoniums.

Conclusion

La diffraction des rayons X associés aux divers traitements chimiques a permis l'identification et la semi-quantification des espèces argileuses constituant les cinq vertisols ainsi que la détermination de la charge des argiles gonflantes. Les fractions argileuses des vertisols des cinq régions étudiées, la Chaouia, le Gharb, le Zaër, les Doukkala et le Saïs sont dominées par les smectites. Elles renferment également des quantités variables mais souvent faibles d'illite, de kaolinite, de chlorite, de quartz et de feldspaths. Les capacités d'échange cationiques totales (CEC totale) sont assez élevées. Elles sont comprises entre 85,3 cmole(+)/kg et 108,5 cmole(+)/kg d'argile sèche et reflètent la richesse des fractions argileuses de ces sols en smectite. La fraction argileuse du vertisol de la Chaouia est de type beidellitique, présentant la CEC totale et la charge interfoliaire les plus élevées, soient 108,5 cmole(+)/kg et 0,57 mole (-) par demi maille. La fraction argileuse du vertisol de Doukkala constituée d'un mélange de beidellite et de montmorillonite, avec une dominance de cette dernière présente la CEC totale et la charge interfoliaire les plus faibles, soient 85,3 cmole(+)/kg et 0,36 mole (-) par demi maille. Les fractions argileuses des vertisols du Zaër, Gharb et Saïs sont des mélanges de beidellite et de montmorillonite. Leurs CEC et leurs charges interfoliaires sont intermédiaires entre celles des vertisols de la Chaouia et de Doukkala.

Références

1. Badraoui M., Fassi D. *Encyclopédie du Maroc*, 8 (1995) 2663-2667.
2. Legros J.P. *Science et Technologie de l'environnement*. (2007) 1-567.
3. Moujahid Y., Physico-chimie et dynamique du phosphore et du potassium dans quelques sols marocains. *Thèse de doctorat d'état*, 114 p. Faculté des sciences, Rabat. (2007).
4. Touhtouh D., E.M. Elfaleh, Moujahid Y. *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (S2) (2014) 2534-2539
5. Schoen U, *Cahiers de la Recherche Agronomique, Rabat*, 26 (1969) 1-153.
6. Al Majou H., *5ème colloque du groupe Français des argiles, Mulhouse, France* (2007).
7. Saidi D., Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y., Tessier D., *Etude et Gestion des Sols, Algerie*, 15 (2008) 241-253.
8. Salles F. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, (2006) 1-327, France
9. Tessier D., Bigorre F., Bruand A., *Compte rendu de l'Académie d'Agriculture, France* 85 (1999) 3-5
10. Athmania D., Benaïssa, A., Bouassida, M., *Colloque international Sols non saturés et environnement, « UNSA » Tlemcen, Algérie* (2009).
11. Velde B., Meunier A. *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag* (2008).
12. Deshmukh V V and Ray, S K and Chandran, P and Bhattacharyya, T and Pal, D K. *Clay Research*, 31 (2) (2012). pp. 84-93. ISSN 0255-7193
13. Moujahid Y., Bouabid R., *J. Mat. Envir. Sci.*, 5 (2014) 1541-1550
14. Badraoui M. Diss PH. D., *Soil Science Depart, Univ. Of Minnesota* (1988).
15. Barre P., Velde B., Abbadie L., *Biogeochemistry* 82 (2007a) 77-88
16. Hofmann, V., Klemen, R., *Anorg. AllG. Chem.*, 262 (1950) 95-99.
17. Reynolds R.C., *Proceeding International Clay Conference Deuver* (1985).
18. Robenhorst M.C., Wilding L.P., *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 48 (1984) 216-219.
19. Jackson M.L., *Soil Chemical Analyses: Advanced courses, 2nd Ed. 11th Printing. University of Wisconsin, Madison* (1979).
20. Holtzapffel, T., *Société Géologique du Nord* 12 (1985) 95-106.
21. Lagaly G., Weiss, A. in: L. Heller (ed) *Proceeding International Clay Conference*. Tokyo, Japon, (1969) 61-80.
22. Sankayi A.L., Dixon J.B., Hosner L.R., Kippenberger L.A., *Soil Sci. Soc. American J.* 9 (1985) 1054-1060.
23. Badraoui M., Bloom P.R., *Soil Sci. Soc. American J.*, 54 (1990) 267- 274.
24. Bouabid R. *Thèse de 3^{ème} cycle, IAV Hassan II, Rabat* (1987).
25. Lagaly G., Fernandez Gonzalez M., Weiss A., *Clay Minerals*, 11 (1976) 173-187.

(2015) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>