



Caractérisations physico-chimiques de trois types de sols du Saïs, Maroc

Physical and chemical characterization of three types of soils of Saïs, Morocco)

D. Touhtouh¹, Y. Moujahid², E.M. El Faleh¹, R. EL Halimi³

¹Faculté des sciences, département de Géologie, B.P 11201 Zitoune- Meknès.

²Centre Régional de la Recherche Agronomique – URGDRNESR, route Haj Kaddour, B.P 578 - Meknès.

³Faculté des sciences, département de Mathématiques, unité de statistiques, B.P 11201, Zitoune, Meknès.

* Auteur correspondant : E-mail: tdriss@hotmail.fr

Résumé

La zone étudiée fait partie du Saïs, qui est un ensemble très vaste de plaines et de plateaux du Maroc nord central. La majorité des sols du Saïs dérivent des calcaires lacustres et des sables dits fauves. Ces derniers reposent sur des marnes tortonniennes intercalées avec des grès et des conglomérats. La caractérisation physico-chimique de trois classes de sols représentant la région de Saïs (sur deux profondeurs : 0-30 cm et 30-60 cm) a permis de mettre en évidence la domination de la fraction argileuse dans les vertisols et les sols calcimagnésiques alors que ce sont les sables qui dominent dans les sols fersiallitiques. Dans les trois types de sols cités ci-dessus, la matière organique présente des teneurs faibles. La capacité d'échange cationique est fortement liée à la fraction minérale et se sont donc les argiles qui déterminent la quantité des bases échangeables dans les sols. La valeur moyenne du pH (7,62) situe les trois types de sols parmi les sols neutres à légèrement basiques. Les sols calcimagnésiques montrent des teneurs en calcaire total élevées par rapport aux vertisols et aux sols fersialitiques. Pour la majorité des sols étudiés, les teneurs en nitrates et en phosphates sont relativement importantes en surface qu'en profondeur.

Mots-clés : Saïs ; Maroc ; physico-chimiques ; vertisols ; sols calcimagnésiques ; sols fersiallitiques.

Abstract

The study area is part of Saïs, which is a very wide range of plains and plateaus of central northern Morocco. The majority of soils derived from Saïs lacustrine limestones and called tawny sands. These are based on Tortonian marls intercalated with sandstone and conglomerates. The physico-chemical characterization of three classes of soil representing the Saïs region (two depths: 0-30 cm and 30-60 cm) has highlighted the dominance of the clay fraction in Vertisols and calcimagnesian soils while it is the sands that dominate in the fersiallitic soils. In the three soil classes mentioned above, the organic matter is present in low concentrations. The cation exchange capacity is closely linked to the mineral fraction and in the clays that determine the amount of exchangeable bases in soils. The average pH value (7.62) is the three soil types from neutral to slightly basic soils. The Calcimagnesian soils show high levels of total limestone compared to Vertisols and fersiallitic soils. For the majority of soils studied, the levels of nitrates and phosphates are relatively important on the surface more than in the depth.

Keywords: Saïs ; Morocco ; physico-chemical; Vertisols; calcimagnesian soils; fersiallitic soils.

1. Introduction

Le secteur agricole joue un rôle important dans la croissance de l'économie marocaine. En effet, il constitue un appui fort au développement du pays puisqu'il représente jusqu'à 20% du produit intérieur brut et emploie environ 40% de la population active [1, 2].

Au Maroc, on distingue plusieurs types de sols qui se sont développés sur différents substrats géologiques et dans divers contextes climatiques, topographiques et biotiques.

Dans le Saïs, qui fait l'objet de cette étude, les principaux types de sols sont : les sols calcimagnésiques, les plus prédominants (63%), suivi des sols fersiallitiques (15%) et les vertisols (11%) [3]. Il est à signaler que ces mêmes types de sols se retrouvent dans d'autres régions du Maroc (la basse et la haute Chaouia, les Zaers, les Doukkalas).

La caractérisation physico-chimique des sols de Saïs est rarement abordée de façon détaillée [4]. Les principales études disponibles traitent d'une façon générale les encroûtements carbonatés, la reconnaissance des formations aquifères [5, 6] et la dynamique de quelques éléments nutritifs (phosphore et potassium) des sols de Saïs. Le présent travail, qui à travers une étude comparative entre les trois types de sols cités ci-dessous, vient enrichir et approfondir les connaissances physico-chimiques sur ces différents types de sols.

2. Situation géographique de la zone étudiée

La zone étudiée fait partie du Saïs, qui est un ensemble très vaste de plaines et de plateaux du Maroc nord central (figure 1). Ce dernier présente un quadrilatère de près de 2700km² porté à une altitude moyenne de 600m. Il s'agit d'une région agricole ayant une intensification importante des cultures liée à sa richesse hydrique circulant dans les formations superficielles. Le substrat lithologique est constitué de trois strates sédimentaires : une dalle calcaire lacustre du pliocène superposée à des sables et des marnes marines profonds d'âge pliocène continental [6]. Le climat de la région est de type méditerranéen caractérisé par son hiver frais et humide et son été sec et chaud. Un tel climat : favorise, par ses précipitations, la dissolution et l'évacuation des éléments et permet, par ses températures, une activité biologique importante et d'accélérer des réactions chimiques sous l'action de l'eau et des solutés.

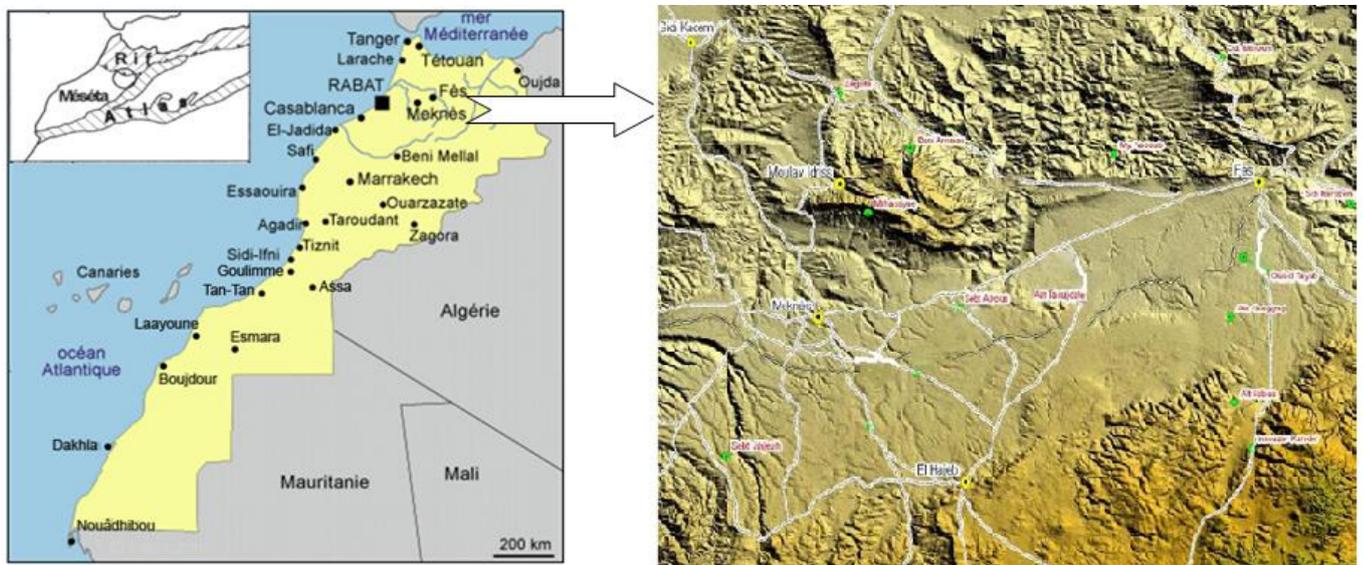


Figure 1 : Situation de la zone étudiée.

3. Matériel et méthodes

3.1 Echantillonnage

L'échantillonnage adopté dans cette étude consiste à exploiter les principaux sols qui caractérisent le Saïs (les sols calcimagnésiques, les sols fersiallitiques et les vertisols). Chaque type de sol est représenté par deux profils représentatifs de la zone étudiée. Le choix de ces profils a été basé sur la carte pédologique de la région de Saïs (tableau 1). Dans chaque profil, les prélèvements ont été effectués sur deux profondeurs (0-30cm et 30-60cm). Le choix de ces profondeurs est dictée par le fait qu'elles sont les parties du sol où les racines prospèrent en

fixant la plante sur son support et en alimentant celle-ci en différents facteurs de la croissance végétale : chaleur, eau, ensemble des éléments nutritifs ; c'est aussi là, où la notion de la fertilité d'un sol est bien rattachée [7].

Tableau 1 : Situations géographiques et couleurs des sols étudiés

Types de sols	profondeurs	Couleurs selon MUNSELL Soil Color Chart	Situation géographique
Vertisol (1)	0----30 cm 30----60cm	10YR2/2 10YR2/2	Agouray
Vertisol (2)	0----30 cm 30----60cm	10YR3/1 10YR3/1	Ain Kerma
S. Calsimagnésique (1)	0----30 cm 30----60cm	10YR3/3 10YR7/6	Haj Keddour
S. Calsimagnésique (2)	0----30 cm 30----60cm	10YR3/4 10YR7/6	Lamhaya –Fès
S. fersialitique (1)	0----30 cm 30----60cm	2,5YR7/6 2,5YR7/8	Sbae Ayoun
S. fersialitique (2)	0----30 cm 30----60cm	2,5YR6/8 2,5YR5/8	Taoujdate

Les échantillons de sols prélevés sont séchés à l'air, broyés et tamisés à 2mm.

3.2 Analyses physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés ont été déterminées à l'aide des techniques suivantes [8,9] :

- Granulométrie : effectuée à la pipette de Robinson, après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, du calcaire total à l'acétate de sodium 1N, dispersion à l'hexametphosphate de sodium.
- pH « eau » : mesuré au pH-mètre sur une solution sol/eau à 1/2,5.
- Matière organique quantifiée par la méthode Walkley-Black.
- Calcaire total : déterminé au calcimètre de Bernard, après attaque HCL 6N.
- Bases échangeables : saturation par une solution d'acétate d'ammonium 1N ajusté à pH=7. Le dosage des cations a été effectué par absorption atomique et photomètre à flamme.
- Capacité d'échange cationique (CEC) : déterminée par la méthode à l'acétate de sodium.
- Nitrates : déterminés par l'acide chromotrope.
- Phosphore disponible : déterminé à l'aide du bicarbonate de sodium (NaHCO₃) 0,5M à pH : 8,5.
- Humidité : déterminée par la différence des pesées du sol séché à l'air ambiant et chauffé à 105°C.
- Calcul des coefficients de corrélation de Pearson : on a déterminé, pour l'ensemble des sols étudiés, deux coefficients de corrélation de Pearson : un entre la CEC et le pourcentage d'argile et l'autre entre la CEC et le pourcentage de la matière organique.

3.3 Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du Logiciel R (Core Team, 2014) [10]. Les données ont été analysées à l'aide de l'analyse de la variance et la comparaison des moyennes a été faite par le test de Tukey [11]. Le test a été appliqué à un niveau de probabilité de $p = 0,05$ à trouver des différences significatives entre les moyennes. Ces analyses ont été réalisées dans le but de comparer les caractéristiques moyennes des trois types de sols étudiés. Cette comparaison a été faite, d'une part sans distinction entre les deux profondeurs et, d'autre part, séparément pour chacune des deux profondeurs. Pour ce faire, l'analyse descriptive, des différentes caractéristiques, qui a été réalisée dans cette étude est la suivante : moyenne, écart-type et médiane et analyse de la variance.

4. Résultats

4.1 Constituants physiques des sols étudiés

L'analyse granulométrique (tableau 2) montre la dominance de la fraction argileuse dans les vertisols et les sols calcimagnésiques, alors que les sols fersialitiques sont enrichis en sables. Du point de vue quantitative, ce sont les vertisols qui sont les plus riches en fraction argileuse en surface (58% et 78%) et en profondeur (59% et

61%). Les sols fersiallitiques renferment la plus faible proportion d'argiles en surface (12% et 18%) et en profondeur (13% et 21%).

Tableau 2 : Constituants physiques des trois types de sols étudiés.

Types de sols	Profondeurs	Granulométrie (%)		
		Argiles	Limons	Sables
Vertisol(1)	0-----30cm	78,32	9,33	6,06
	30-----60cm	61,72	6,82	5,86
Vertisol(2)	0-----30cm	58,68	12,35	14,23
	30-----60cm	59,10	8,83	13,57
S.Calcimagnésique(1)	0-----30cm	42,22	15,35	13,77
	30-----60cm	35,10	12,80	7,71
S.Calcimagnésique(2)	0-----30cm	49,68	11,55	11,18
	30-----60cm	31,13	10,47	9,59
S. fersialitique(1)	0-----30cm	12,80	4,72	67,20
	30-----60cm	13,88	3,42	74,86
S. fersialitique(2)	0-----30cm	18,85	1,15	78,75
	30-----60cm	21,45	3,52	69,91

4.2 Caractérisation physico-chimique des sols

Les résultats relatifs au calcaire total, pH, matière organique, bases échangeables et capacité d'échange cationique (CEC) sont représentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats des analyses physico-chimiques des sols étudiés.

Types de sols	Profondeurs (cm)	CaCO ₃ total (%)	pH	M.O (%)	Cations échangeables (meq/100g)				CEC (meq%)	Humidité %
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
Vertisol (1)	0-----30	3,4	7,46	1,42	79,95	10,96	1,27	0,42	82,3	10,28
	30-----60	8,94	7,82	1,12	92,68	12,56	2,42	0,46	85,88	10,29
Vertisol (2)	0-----30	3,62	7,86	1,18	85,14	5,2	2,37	0,36	74,75	8,42
	30-----60	3,19	7,88	0,88	91,48	5,88	2,42	0,67	66,6	11,99
S.Calcimagnésique (1)	0-----30	19,15	7,57	2,24	64,04	2,03	0,34	0,4	56,66	6,47
	30-----60	45,32	7,92	0,12	52,54	1,6	0,17	0,24	38,77	8,90
S.Calcimagnésique (2)	0-----30	17,55	7,74	2,18	53,23	1,94	2,5	0,66	53,48	5,85
	30-----60	42,77	8,01	1,3	61,12	1,72	2,29	0,39	39,17	5,92
S.Fersiallitique (1)	0-----30	2,23	7,3	1,95	16,73	1,1	2,29	0,72	26,64	1,72
	30-----60	2,34	7,75	0	15,68	1,74	0,17	0,37	20,48	3,20
S.Fersiallitique (2)	0-----30	2,45	6,89	0,24	13,87	0,4	0,17	0,2	14,32	0,48
	30-----60	1,68	7,35	0	19,88	0,77	0,17	0,11	25,45	0,35

4.2.1 Calcaire total et pH

Les sols calcimagnésiques présentent des teneurs élevées en calcaire total par rapport aux vertisols et aux sols fersiallitiques (tableau 3 ; figure 2). Ces derniers sont décarbonatés sur toutes leurs épaisseurs.

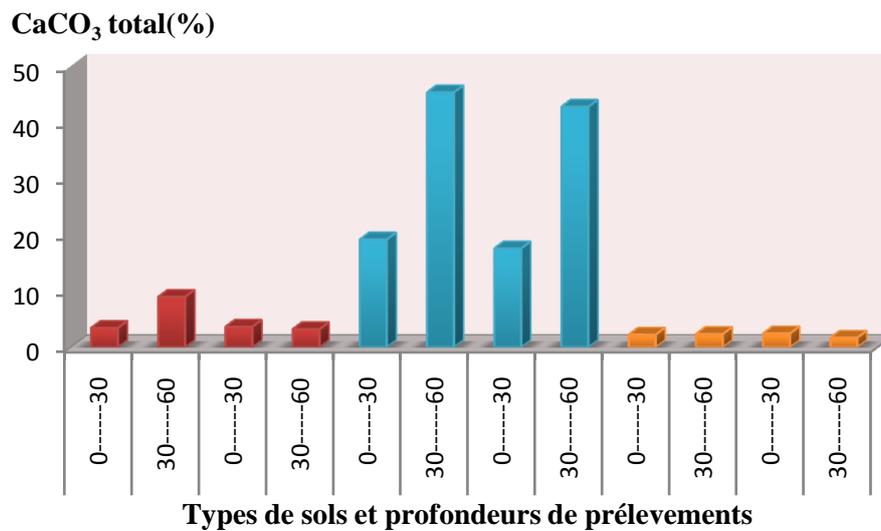


Figure 2. Distribution des sols en fonction de leur teneur en CaCO₃.

Le pH dans l'eau des sols étudiés (tableau 3) varie entre 6,89 pour les sols fersiallitiques et 8,01 pour les sols calcimagnésiques.

4.2.2 Matière organique

Les teneurs en matière organique des horizons de surface des profils étudiés varient entre 0,24% et 2,24% (tableau 3 ; figure 3), ces teneurs sont supérieures à celles des horizons de profondeur (au-delà de 30cm).

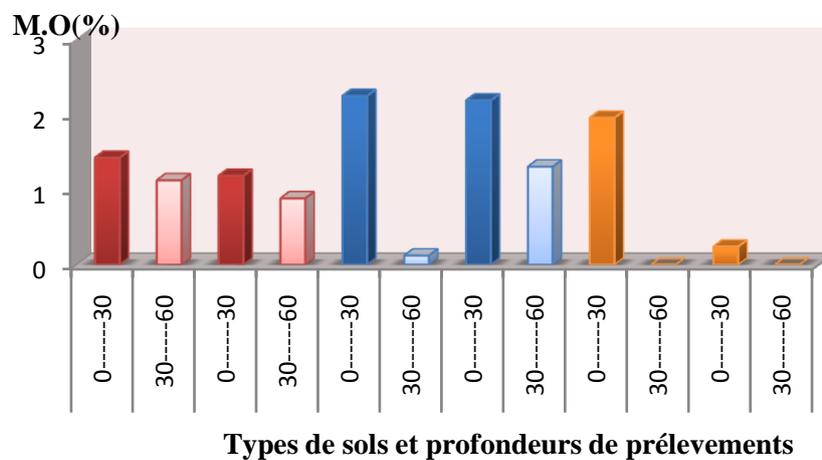


Figure 3 : Distribution des sols en fonction de leur teneur en matière organique.

4.2.3 Bases échangeables

Le calcium est l'élément le plus dominant ; il représente 70% à 80% des cations échangeables dans tous les sols (tableau 3 ; figure 4). Malgré leur décarbonatation, les vertisols et les sols fersiallitiques présentent une teneur élevée en calcium. Les teneurs en magnésium sont relativement importantes ; ce dernier élément ne présente aucune désaturation. Malgré son importance pour la majorité des plantes, le potassium montre des teneurs faibles dans tous les sols. Les teneurs en sodium sont très faibles ; en excès, ce dernier élément devient nuisible.

4.2.4 CEC

En général, la CEC est relativement importante dans les vertisols (tableau 3 ; figure 5) ; elle est de l'ordre de 74,75 meq/100g à 82,30 meq/100g en surface et 66,60 meq/100g à 85meq/100g en profondeur.

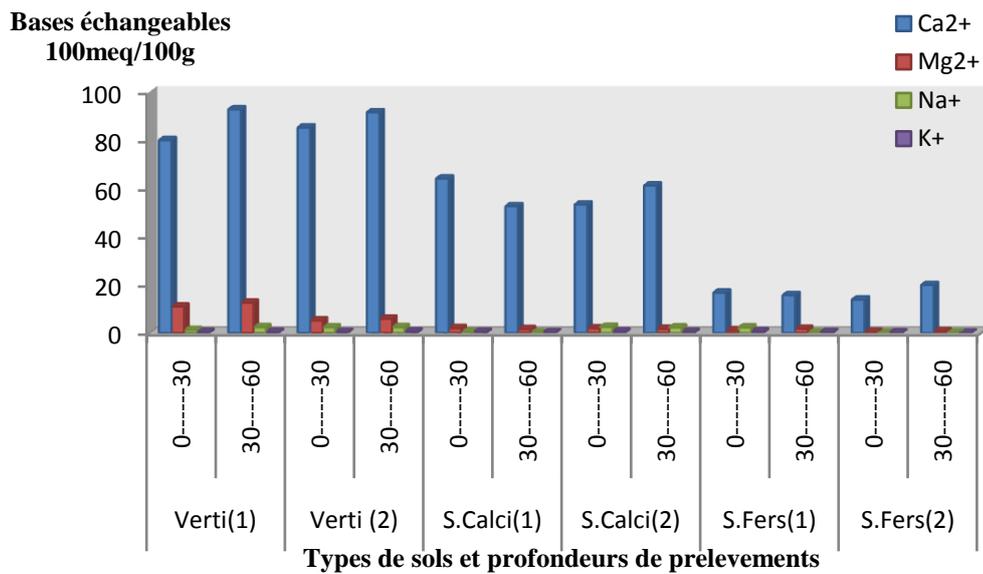


Figure 4 : Distribution des sols en fonction de leur teneur en bases échangeables.

Dans les sols calcimagnésiques, la CEC varie entre 56,66meq/100g et 53,48meq/100g en surface ; ces valeurs chutent en profondeur pour atteindre des valeurs de 38,77meq/100g et 39,17meq/100g. Ceci laisse supposer qu'il y a une différenciation de point de vue proportions minéralogiques d'argile entre la surface et la profondeur ; cette baisse de la CEC le long du profil s'explique bien par la chute des concentrations du Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, en passant de la surface à l'horizon sous jacent.

Dans les sols fersiallitiques, la CEC est faible. Elle est de l'ordre de l'ordre de 14,32meq/100g et 26,64meq/100g en surface ; elle diminue en profondeur pour atteindre des valeurs de 20,48meq/100g et 25,45meq/100g.

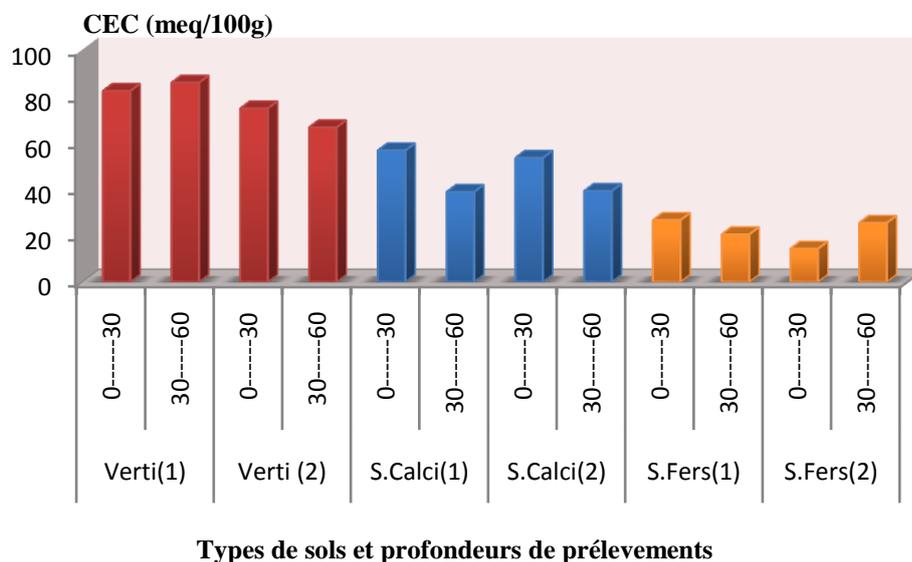


Figure 5 : Distribution des sols en fonction de leur teneur en CEC.

Théoriquement, la CEC est un paramètre qui dépendrait à la fois de la fraction argileuse et de la matière organique [12]. Pour cela, on a déterminé, pour l'ensemble des sols étudiés, deux coefficients de corrélation de Pearson : un entre la CEC et le pourcentage d'argile (figure 6a) et l'autre entre la CEC et le pourcentage de la matière organique (figure 6b). Les coefficients de détermination obtenus montrent que la fraction argileuse explique 92% de la variation de la CEC alors que la matière organique n'explique que 20% de la variation de la CEC. Donc la quantité des bases échangeables dans ces sols est déterminée principalement par les argiles ; par conséquent la CEC dépend surtout de la fraction minérale.

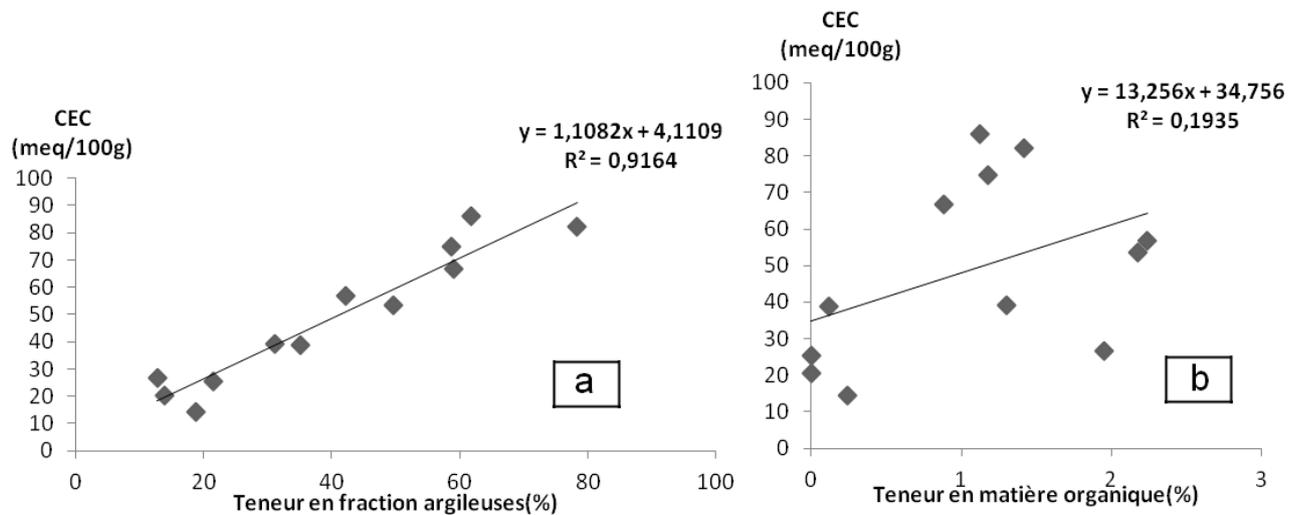


Figure 6 : Relations entre teneur en fraction argileuse et CEC (a) et entre teneur en matière organique et CEC (b).

4.2.5 Humidité

Ce sont les vertisols qui sont les plus humides suivis des sols calcimagnésiques alors que les sols fersiallitiques sont les plus secs (tableau 3 ; figure 7) ; les horizons profonds des vertisols sont les plus plastiques et les plus malléables.

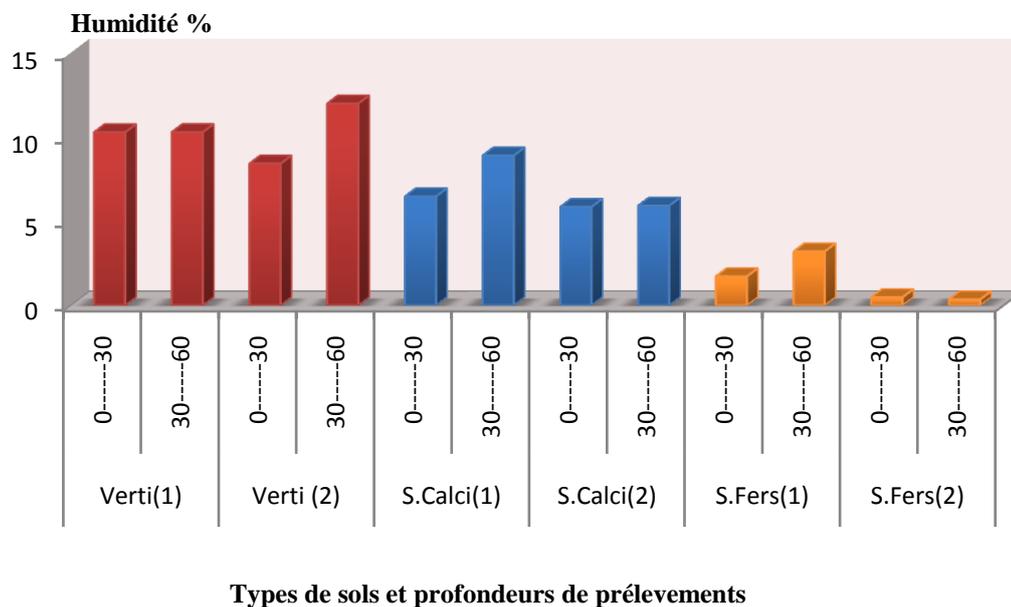


Figure 7 : Distribution des sols en fonction de leur pourcentage en humidité.

4.2.6 Nitrates et phosphore assimilable

Mis à part le vertisol (2) et le sol calcimagnésique (1), les teneurs en nitrates dans le vertisol (1), le sol calcimagnésique (2) et les sols fersiallitiques sont relativement importantes en surface qu'en profondeur (tableau 4). En ce qui concerne les phosphates (tableau 4), le sol fersiallitique (1) montre les teneurs les plus élevées en surface (132,75 ppm) et en profondeur (88,78 ppm). Mis à part les deux vertisols, on peut remarquer que, dans les deux autres types de sols (calcimagnésiques et fersiallitiques), la concentration en phosphore assimilable décroît presque de moitié en allant de la surface à la profondeur.

Tableau 4 : Les teneurs des nitrates et phosphores assimilables dans les sols étudiés.

Types de sols	Profondeurs (cm)	Nitrates (ppm)	Phosphore (ppm)
Vertisol (1)	0-----30	11,35	19,3
	30-----60	8,36	19,67
Vertisol (2)	0-----30	3,42	17,46
	30-----60	7,17	24,11
S.Calcimagnésique (1)	0-----30	6,12	21,52
	30-----60	6,57	13,02
S.Calcimagnésique (2)	0-----30	6,37	52,19
	30-----60	3,62	38,89
S.Fersiallitique (1)	0-----30	11,85	132,75
	30-----60	3,23	88,78
S.Fersiallitique (2)	0-----30	5,87	38,52
	30-----60	1,58	20,41

4.3 Analyse statistique

Les principaux résultats des analyses statistiques sont donnés dans les tableaux 5, 6 et 7.

4.3.1 Analyse descriptive des différentes caractéristiques : moyenne, écart-type et médiane

Les statistiques descriptives sont l'ensemble des méthodes et des techniques permettant de présenter, de décrire et de résumer, des données nombreuses et variées ; elles nous permettent de connaître les caractéristiques de notre échantillon : moyenne, médiane, et écart-type (tableau 5).

Tableau 5 : Analyse descriptive des différentes caractéristiques : moyenne, écart-type et médiane.

Type de sol	Analyse descriptive	Argiles	Limon s	Sabl es	CaCO ₃	p H	M.O	PO ₄ ³⁻	N O ₃	CE C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Hum- idité
Vertisols	Moyenne	64,45	9,33	9,93	4,78	7,75	1,15	20,13	7,57	77,38	87,31	8,65	2,12	0,47	10,24
	Ecart-type	9,34	2,28	4,59	2,77	0,19	0,22	2,82	3,28	8,55	5,91	3,66	0,56	0,13	1,45
	Médiane	60,40	9,08	9,81	3,51	7,84	1,15	19,48	7,76	78,52	88,31	8,41	2,39	0,44	10,28
S.Calcimagnésique s	Moyenne	39,53	12,54	10,56	31,19	7,81	1,46	31,40	5,67	47,02	57,73	1,82	1,32	0,42	6,78
	Ecart-type	8,17	2,09	2,56	14,88	0,19	0,99	17,54	1,37	9,38	5,73	0,19	1,24	0,17	1,43
	Médiane	38,66	12,17	10,38	30,96	7,83	1,74	30,20	6,24	46,32	57,17	1,82	1,31	0,39	6,19
S. Fersiallitiques	Moyenne	16,74	3,20	72,68	2,17	7,32	0,54	70,11	5,63	21,72	16,53	1,00	0,70	0,35	1,43
	Ecart-type	4,09	1,49	5,14	0,34	0,35	0,94	50,79	4,50	5,61	2,52	0,56	1,06	0,26	1,32
	Médiane	16,36	3,47	72,38	2,28	7,32	0,12	63,65	4,55	22,96	16,20	0,93	0,17	0,28	1,10

La moyenne est la somme des valeurs de la variable divisée par le nombre d'individus. La médiane est un nombre qui divise en 2 parties la population telle que chaque partie contient le même nombre de valeurs. La moyenne a un gros défaut : elle est très sensible aux valeurs extrêmes. La médiane est un indicateur qui permet au contraire de ne pas faire attention aux valeurs extrêmes. De ce fait, on l'utilise en complément de la moyenne. L'écart-type est la mesure de dispersion la plus couramment utilisée en statistique, Il mesure la dispersion autour de la moyenne, L'écart-type est influencé par les valeurs extrêmes ; une seule de ces valeurs pourrait avoir une grande influence sur les résultats de l'écart-type.

Pour les vertisols, et par rapport à la moyenne de l'ensemble des variables, l'écart-type est plus petit. La dispersion des mesures autour de la moyenne est plus étroite. Les résultats sont donc plus cohérents.

Pour les sols calcimagnésiques L'écart-type est influencé par les valeurs extrêmes dans le calcaire total et le phosphore assimilable ; ces valeurs pourraient avoir une grande influence sur les résultats de l'écart-type. Ceci dit, Plus il y a d'hétérogénéité des scores, plus l'écart type correspondra à une valeur élevée. A l'inverse, dans les autres variables où les scores sont relativement proches de la moyenne, l'écart type est plus petit.

Pour les sols fersiallitiques, c'est dans le phosphore et les nitrates où l'écart-type représente à quel point les scores sont éloignés de la moyenne, alors que dans les autres variables, l'écart-type est petit, et les valeurs sont rapprochées de la moyenne.

4.3.2 Analyse de la variance pour comparer les caractéristiques moyennes des 3 types de sols (sans distinction entre les deux profondeurs).

L'application de l'ANOVA, en utilisant le test de Tukey pour comparer les caractéristiques moyennes des trois types de sols, et sans distinction entre les deux profondeurs est présentée dans le tableau 6. Ce dernier montre que dans les trois types de sols, la différence des moyennes est non significative pour les paramètres pH, M.O., PO₄, NO₃, Na et K ; elle est également, non significative d'abord entre les vertisols et les sols calcimagnésiques pour les variables limons et sables, ensuite entre les vertisols et les sols fersiallitiques pour le calcaire total, et enfin entre les sols calcimagnésiques et les sols fersiallitiques pour la variable Mg. Tandis que pour, les argiles, CEC, Ca, et humidité, la différence des moyennes est significative entre les trois types de sols, donc on rejette l'hypothèse nulle H₀.

Tableau 6 : Application de l'ANOVA (test de Tukey) pour comparer les caractéristiques moyennes des 3 types de sols sans distinction entre les deux profondeurs.

Type de sol	Argiles	Limons	Sables	CaCO ₃	pH	M.O	PO ₄	NO ₃	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Humidité
Vertisols	64.45a*	9.33 a	9.93b	4.78b	7.75a	1.15a	20.13a	7.57a	77.38a	87.31a	8.65a	2.12a	0.47a	10.24a
S.calcimagnésiques	39.53b*	12.54 a	10.56b	31.19a	7.81a	1.46a	31.40a	5.67a	47.02b	57.73b	1.82b	1.32a	0.42a	6.78b
S.Fersiallitiques	16.74c*	3,20 b	72.68a	2.17b	7.32a	0.54a	70.11a	5.63a	21.72c	16.53c	1.00b	0.70a	0.35a	1.43c

* (a, b, ab et c : sorties alphabétiques du test de Tukey).

4.3.3 Analyse de la variance pour comparer les caractéristiques moyennes des 3 types de sols (séparément pour chacune des 2 profondeurs).

Dans les trois types de sols, et pour chacune des deux profondeurs (0—30cm et 30—60cm), la différence des moyennes est non significative pour, pH, M.O., PO₄, NO₃, Mg, Na, et K, dans ce cas on accepte l'hypothèse nulle H₀. Mais, elle est significative pour le calcium, dans ce cas on rejette l'hypothèse nulle (tableaux 7).

Profondeur 0—30cm.

L'analyse de la variance montre qu'on doit rejeter l'hypothèse nulle H₀ puisque la différence des moyennes est significative entre les vertisols et les sols fersiallitiques pour les paramètres, argiles, sables, CEC, et humidité, et elle est aussi significative entre les vertisols et les sols calcimagnésiques, concernant le CaCO₃. De même, on rejette toujours l'hypothèse nulle tant que la différence des moyenne est significative dans les sols calcimagnésiques et les sols fersiallitiques, et ceci pour, limons, sables, CaCO₃, CEC, et humidité (tableaux 7).

Profondeur 30—60cm.

Dans les trois types de sols, seulement pour les argiles et Ca^{2+} où la différence des moyennes est significative. Alors que, entre les vertisols et les sols fersiallitiques, l'hypothèse nulle H_0 est rejetée pour les paramètres, sables, CEC, et humidité. Entre les vertisols et les sols calcimagnésiques, on rejette l'hypothèse nulle H_0 , pour CaCO_3 et CEC. Entre les sols calcimagnésiques et les sols fersiallitiques, la différence des moyennes est significative pour limons, sables et CaCO_3 (tableaux7).

Tableaux 7 : Application de l'ANOVA (test de Tukey) pour comparer les caractéristiques moyennes des trois types de sols, séparément pour chacune des deux profondeurs (0 - 30cm et 30 - 60cm).

Profondeur : 0 - 30cm														
Type de sol	Argiles	Limons	Sables	CaCO_3	pH	M.O	PO_4	NO_3	CEC	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Humidité
Vertisols	68.5a*	10.84ab*	10.14b*	3.51b	7.66a	1.30a	18.38a	7.38a	78.52a	82.54a	8.07a	1.82a	0.39a	9.35a
S.calcimagnésiques	45.95ab	13.45a	12.47b	18.35a	7.65a	2.21a	36.85a	6.24a	55.07a	58.63b	1.98a	1.42a	0.53a	6.16a
S.Fersiallitiques	15.82b	2.93b	72.97a	2.34b	7.09a	1.09a	85.63a	8.86a	20.48b	15.29c	0.75a	1.23a	0.46a	1.10b
Profondeur : 30 - 60cm														
Type de sol	Argiles	Limons	Sables	CaCO_3	pH	M.O	PO_4	NO_3	CEC	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Humidité
Vertisols	60.41a	7.82ab	9.71b	6.06b	7.85a	1,00 a	21.89a	7.76a	76.24a	92.07a	9.22a	2.42a	0.56a	11.14a
S.calcimagnésiques	33.11b	11.63a	8.65b	44.04a	7.96a	0.71 a	25.95a	5.09a	38.97b	56.82b	1.65a	1.23a	0.31a	7.41 ab
S.Fersiallitiques	17.66c	3.47b	72.38a	2.01b	7.55a	0,00 a	54.59a	2.40a	22.96b	17.78c	1.25a	0.17a	0.24a	1.77 b

* (a, b, ab et c : sorties alphabétiques du test de Tukey).

5. Discussion

Du point de vue granulométrique, les vertisols présentent une texture argileuse. L'argile est distribuée de façon régulière sur tout le profil. Les sols calcimagnésiques montrent un taux d'argile plus élevé en surface et semble diminuer avec l'augmentation du taux de calcaire en profondeur. Dans les sols fersiallitiques développés sur sables, la texture est bien sableuse, avec une légère augmentation des argiles dans l'horizon profond. A l'exception des sols sableux, la structure est généralement grumeleuse en surface. En profondeur, elle est polyédrique et devient prismatique quand la texture est argileuse. D'une manière générale, la structure est bien développée et stable et confère aux sols de la région, une bonne résistance envers certains facteurs de dégradation. Les sols étudiés sont rarement totalement décarbonatés, on y décèle au moins des traces de carbonates libres à un niveau ou à un autre du profil. Les vertisols et les sols fersiallitiques montrent des teneurs faibles en calcaire total. Les sols calcimagnésiques présentent un taux élevé en calcaire ; on y remarque la présence d'un encroûtement calcaire, comme cela a été signalé par d'autres auteurs [5, 13]. La valeur moyenne du pH (7,62) situe ces sols parmi les sols neutres à légèrement basiques ; ceci montre que ces sols restent influencés par le calcaire. L'examen de la répartition de la matière organique avec la profondeur montre que tous les sols sont imprégnés d'humus sur toute leur épaisseur, sauf dans l'horizon profond des sols fersiallitiques. Pour les vertisols et le sol fersiallitique (2), le taux de matière organique diminue de façon progressive et régulière avec la profondeur alors que pour le sol fersiallitique (1) et les sols calcimagnésiques, la diminution de la matière organique est brutale en passant de la surface à l'horizon sous-jacent. Les cations basiques, qui interviennent comme éléments nutritifs, jouent aussi un rôle essentiel dans la neutralisation de l'acidité, le maintien de l'activité biologique et la structuration des sols [14]. Le calcium et le magnésium sont généralement en quantité suffisante pour assurer les besoins des plantes ; le complexe absorbant est pratiquement saturé en ces alcalineux-terreux. Le sodium n'est pas indispensable aux plantes ; en excès, il devient nuisible. Le potassium indispensable à la vie de la plante est souvent présent dans les sols argileux [15] ; par contre, il montre des carences dans les horizons profonds des sols sableux. Malgré la faible teneur en matière organique, qui ne dépasse que rarement 1,5% en surface et chute en profondeur, c'est la fraction

argileuse qui se comporte comme agent principal dans l'édification de la structure des sols et comme élément indispensable favorisant la nutrition des plantes.

En accord avec certains auteurs [16, 17 et 18], les minéraux argileux dont disposent les vertisols et les sols calcimagnésiques (smectites) laissent pénétrer facilement l'eau entre leurs feuillets et créent dans le sol des réserves d'eau importantes favorisant ainsi une bonne nutrition des plantes. Alors que les argiles des sols fersiallitiques sont incapables de fixer l'eau entre leurs feuillets ; leurs propriétés d'hydratation diffèrent de celles des smectites. En effet, dans ces sols, on a montré la dominance des minéraux argileux de type kaolinite et illite (travaux de thèse en cours).

Le nitrate (NO_3^-) est la forme assimilable disponible pour les plantes, elle est activée dans les sols bien aérés, non acides, et riches en calcium, tel est le cas des sols étudiés. Pour le phosphore, la forme assimilable est représentée par les ions (PO_4^{3-}) échangeables, absorbés par le complexe anionique ; il est mobilisé de façon progressive ; sa diffusion est cent fois plus faible que celle du calcium. La disponibilité du phosphore est bien liée à la nature et à l'état de l'agent absorbant [14]. Dans notre cas, elle est faible dans les vertisols et les sols calcimagnésiques, qui ont des teneurs élevées en argiles ; alors que cette disponibilité est importante dans le sol fersiallitique (1), et qui présente une faible teneur en fraction argileuse. L'analyse de la variance pour comparer les caractéristiques moyennes des 3 types de sols et sans distinction entre les deux profondeurs a montré que dans les trois types de sols, la différence des moyennes est significative seulement pour, les argiles, CEC, Ca, et humidité, alors que cette différence est non significative pour, pH, M.O, PO_4 , NO_3 , Na, et K. L'application de l'ANOVA, en utilisant le test de Tukey pour comparer les caractéristiques moyennes des trois types de sols séparément pour chacune des deux profondeurs (0 - 30cm et 30 - 60cm), a montré que, dans l'horizon de surface, la différence des moyennes est significative seulement pour le calcium, et ceci dans les trois types de sols ; alors que les sols fersiallitiques sont les moins humides et les plus riches en sables, tandis que seulement les sols calcimagnésiques qui se caractérisent par un taux élevé en calcaire total. Dans l'horizon profond, et dans les trois types de sols, la différence des moyennes est significative pour les argiles et le calcium ; les vertisols s'individualisent par une grande capacité d'échange cationique, les sols calcimagnésiques ont le taux le plus élevé en CaCO_3 ; et les sols fersiallitiques se caractérisent par les teneurs les plus élevées en sables.

Conclusion

Le Saïs est une des grandes régions agricoles du Maroc central. Elle est caractérisée par trois grands types de sols (les Vertisols, les sols calcimagnésiques et les sols fersiallitiques). Dans ce travail, nous avons réalisé une étude comparative des caractéristiques physico-chimiques de ces trois classes de sols.

Dans les vertisols, les argiles, qui sont les dominantes, sont distribuées de façon régulière sur tout le profil, avec une légère augmentation en profondeur ; alors que pour les sols calcimagnésiques, la fraction argileuse est plus abondante en surface et semble diminuer avec l'augmentation de calcaire en profondeur. Les sols fersialitiques, développés sur sables, se caractérisent par un profil textural différent en présentant une légère augmentation en profondeur de la fraction argileuse et une dominance des sables le long du profil. Pour tous les sols, la structure est généralement grumeleuse en surface, alors qu'en profondeur elle devient prismatique quand la texture est argileuse, mais reste polyédrique pour les vertisols fortement imprégnés de calcaire. En général, les trois types de sols présentent, en matière de propriétés physiques, une texture équilibrée à argileuse et une structure bien développée et stable qui confère aux sols une bonne résistance contre les facteurs de dégradation et contribue à un drainage satisfaisant.

Du point de vue chimique, le complexe argileux- humique des vertisols et des sols calcimagnésiques est saturé en bases échangeables et principalement le calcium et le magnésium ; ceci est justifié par la présence d'un ensemble minéralogique argileux qui agit activement dans les échanges avec la solution du sol. Malgré la présence d'une faible teneur de matière organique, c'est la matière minérale qui intervient essentiellement dans les échanges cationiques. Donc la fertilité des sols et le raisonnement de leur fertilisation sont attribués à la quantité et la nature des argiles présentes dans les sols.

Références

1. Moussadek R., *Impacts de l'agriculture de conservation sur les propriétés et la productivité des vertisols du Maroc Central - Afrika focus* 25(2012) 147-151
2. Badraoui, M., Dahan, R. *The Green Morocco Plan in relation to food security and climate change. In Solh, M., Saxena, M.C. (Eds.), Proceedings of International Conference on Food Security and Climate Change in the Dry Areas, Amman, Jordan, ICARDA Publication, (2010). p. 61-70.*

3. El Idrissi R.M., *Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France* (1992).
4. Moujahid Y., *Physico-chimie et dynamique du phosphore et du potassium dans quelques sols marocains. Thèse de doctorat., Faculté des sciences, Rabat. Maroc* 114p. (2007).
5. Essahlaoui A., *Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Meknès-Fès (Maroc) : prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées. EMI. Rabat. 250p.* (2000).
6. Ahmamou M., *Etude sédimentologique des calcaires lacustres Saïssiens (Plio-Quaternaire) du bassin de Fès-Meknès (Maroc). Thèse du 3^{ème} cycle. Aix Marseille III. France. 178p.* (1987).
7. Touhtouh D., El Faleh E.M., Moujahid Y., *Caractérisations physico-chimiques et minéralogiques des sols du Sais, Maroc. J. Mater. Environ. Sci.* 5(S2) (2014), pp. 2534-2539.
8. Edahbi M., Khaddor M., Salmoun F., *Caractérisation des sols du Nord du Maroc (Bassin Loukkos). J. Mater. Environ. Sci.* 5 (S1) (2014) 2133-2138.
9. Mathieu C., Pieltain F., *Analyse Chimique des sols, Méthodes choisies. Edition TEC & DOC, ISBN : 2-7430-0620-X. Paris, France* (2003).
10. Lafaye de Micheaux P., Drouilhet, R., Liquet B., *Effectuer des analyses statistiques, Edition Springer-Verlag. ISBN 978-2-8178-0114-8. Paris, France. 448p.* (2011).
11. Touhtouh D., El Halimi R., Moujahid Y., El Faleh E.M., *Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des sols de Sais, Maroc. European Scientific Journal, ISSN : 1857-7881. Edition vol. 10, N°15* (2014) 140-158.
12. Benhassine H., *Nature minéralogique et rôle nutritionnel des argiles de sols céréaliers en région subhumide à semi-aride (Tunisie). C. R. Géosci.* 338(2006) 329-340.
13. El Faleh E.M., *Carbonatations, silicifications et argilogénèse dans les formations continentales des bassins de Bou-Anguer et de Jbel Rhassoul (Moyen-Atlas, Maroc). Thèse de doctorat, Université Moulay Ismail* (2002) 235p.
14. Duchauffour P., *6^{ème} édition de l'abrégé de pédologie, Edition DUNOD, ISBN : 2 10 005440 6. Paris, France* (2001) 331p.
15. Moujahid Y., Bouabid R., *Potassium-Calcium exchange in clays of selected Moroccan vertisols. J. Mater. Environ. Sci* 5 (5) (2014) 1541-1550
16. Carner L., *Phyllosilicates des sols : de l'identification à la quantification. Thèse d'habilitation à diriger des recherches. Sciences de la Terre. Université de Poitiers, France. 149p.* (2011).
17. Calvet R., *Le Sol, Propriétés et fonction. tome 1. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces, Edition DUNOD, ISBN : 10 2855570824. Paris-Grignon. France.* (2003) 456p.
18. Moujahid Y., Bouabid R., *Mineralogy and charge of Moroccan vertisols smectite, J. Mater. Environ. Sci.* 6 (11) (2015) 3328-3337.

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