

المملكة المغربية

ROYAUME DU MAROC

INSTITUT AGRONOMIQUE
ET VÉTÉRINAIRE HASSAN II



معهد الحسن الثاني
للزراعة والبيطرة

Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Agronomie

Option : Management des ressources en sol et en eaux

Evaluation de la biodisponibilité du silicium dans les sols marocains soumis à la culture de blé tendre en bour

Présenté et soutenu publiquement par

ZAKI Asma

Jury

Pr. BOUAZIZ A.

Pr. NAIMI M.

Pr. CHIKHAOUI M.

Pr. BOUHALOUA M.

Dr. ZUCCA C.

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

IAV Hassan II

IAV Hassan II

IAV Hassan II

IAV Hassan II

ICARDA

Octobre 2018



REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, c'est avec émotion que je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet. En particulier :

Mr. NAIMI Mustapha et Mr. CHIKHAOUI Mohamed, Professeurs à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II de Rabat, qui m'ont offert l'opportunité de réaliser ce projet. Je tiens à les remercier pour leur confiance qui m'a continuellement porté vers l'avant durant cette étude. Ainsi pour leurs conseils et leurs remarques percutantes. C'est un plaisir de travailler à leurs côtés.

Mr. ZUCCA Claudio, pour m'avoir fait bénéficier, tout au long du projet, de ses conseils, de ses critiques, de son savoir-faire ainsi et sa riche expérience. Je le remercie également pour son aide dans la rédaction de ce rapport et pour les discussions fructueuses que nous avons eues, et qui m'ont beaucoup appris et m'ont permis de mener à bien ce travail.

J'adresse mes remerciements à Dr. HUGHES Harold et à Prof. SAVER Daniela d'avoir participé à cette étude. Sans eux, ce travail n'aurait jamais vu le jour. Je les remercie pour leurs conseils et leur aide au cours de la réalisation du travail du terrain, et d'avoir veiller sur la réalisation des analyses du Silicium dans leur laboratoire de géographie à l'Université de Göttingen en Allemagne.

Je remercie Madame NEISKE Friederike, étudiante en Master à l'Université de Göttingen, pour son aide pendant les travaux de terrain que nous avons réalisé ensemble et les analyses du Silicium qu'elle a pu effectuer au laboratoire de géographie.

Je tiens également à remercier Mr. BOUAZIZ Ahmed, Professeur à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à exprimer ma vive gratitude à Monsieur BOUHALOUA Mhammed, Professeur à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, qui a répondu favorablement à notre invitation pour s'associer au jury de soutenance, en qualité d'examineur.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur KORKOT Houssain et Mr. MAKROUM Omar, techniciens au laboratoire de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, pour leur aide et leur disponibilité durant la réalisation des analyses.

Merci aussi à ceux que j'ai certainement oublié !

DEDICACES

A ma chère mère,

En hommage à tous les sacrifices que tu as consenti pour moi durant mes années d'études. Je vous remercie d'avoir fait de moi ce que je suis maintenant. Aucune dédicace, aucun mot, ne saurait exprimer réellement mon profond amour, mon respect et ma vive gratitude.

A Mon cher Père,

Je vous témoigne mon amour et ma gratitude pour votre encouragement continu, et la confiance que vous avez en moi, et j'espère que vous trouvez dans ce travail le résultat de longues années de sacrifices. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.

A Mes chères sœurs et mon cher frère,

Meryem, Larbi et Hafsa

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A tous les membres de la famille ZAKI,

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de ma profonde affection.

A mes chères amies,

Asma, Hafssa, Oumaima, Salma et Yousra

En témoignage de l'amitié qui nous uni, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur. Merci d'avoir existé.

A tous ceux dont l'oubli du nom n'est pas celui du cœur,

Avec mes vœux de réussite et de bonheur,

ZAKI ASMA

RESUME

De nombreux travaux montrent que le silicium est un élément bénéfique pour la croissance des plantes, des céréales en particulier, malgré son statut d'élément non essentiel. En effet le Silicium biodisponible dans le sol peut être un facteur limitant pour atteindre des rendements optimaux.

L'objectif de notre étude sera de caractériser le statut du Silicium dans les sols marocains sous culture de blé tendre dans deux régions du Maroc : Meknès et Settât. Vu la diversité de leurs sols, notre approche consiste à choisir certaines classes de sol en se basant sur les descriptions pédologiques. C'est ainsi que quatre classes ont été identifiées : vertisols, sols calcimagnésiques, sols isohumiques et sols à sesquioxydes de fer.

Pour ce faire, des analyses ont été effectuées pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques du sol, ainsi que pour quantifier la fraction biodisponible de Silicium dans ces sols. A l'issue de cette étude, il convient de dire que la teneur du Silicium diffère d'une zone à une autre et d'une classe de sol à l'autre. La variation de la teneur en Silicium mobile pour la zone de Meknès oscille entre 0.017 à 0.040 mg/g, alors que dans la zone de Settât, la teneur varie entre 0.031 et 0.055 mg/g. En comparant les teneurs en Silicium mobile dans chaque type de sol, on peut dire qu'il est plus abondant dans les sols isohumiques (0.032 – 0.052 mg/g) et les vertisols (0.027 – 0.054 mg/g) que sur les sols à sesquioxydes (0.016 – 0.042 mg/g) et les sols calcimagnésiques (0.028 – 0.037 mg/g).

C'est ainsi qu'un ensemble de relations entre la teneur en Silicium mobile et certains paramètres du sol disponibles dans les études pédologiques ont été définies : des corrélations négatives avec le pH et le calcaire total, ce qui signifie que lorsque ces paramètres diminuent, la teneur en Silicium mobile augmente, et une corrélation positive avec le Mg^{2+} . Cependant, d'autres paramètres sont corrélés positivement avec la teneur en Silicium mobile dépendamment des classes de sols. Pour la classe des sols calcimagnésiques, la classe des sols à sesquioxydes de fer et les vertisols, nous avons trouvé une relation avec la teneur en argile, alors que pour la classe des isohumiques, la teneur en Silicium mobile est corrélée à la teneur en Mg^{2+} .

Mots clés : Silicium, blé, classe de sol, pH, calcaire total, magnésium, Settât, Meknès, Maroc

ABSTRACT

Many studies show that silicon is a beneficial element for the growth of plants, especially cereals, despite its non-essential element status. Hence, the reserve of bioavailable silicon in the soil can be a limiting factor to achieve optimal yields.

The objective of our study is to characterize the status of silicon in Moroccan soils subjected to the cultivation of bread wheat in two regions of Morocco: Meknes and Settat. Given the diversity of their soils, our approach is to select certain soil classes based on soil descriptions. So, four classes have been identified: vertisols, calcimagnetic soils, isohumic soils and soils with sesquioxides.

To do this, physicochemical analyzes were performed to determine soil characteristics, as well as to quantify the bioavailable fraction of silicon in these soils. At the end of this study, it should be said that the silicon content differs from one zone to another and from one soil class to another. The variation of the mobile silicon content for the Meknes study area is between 0.017 and 0.040 mg/g whereas in the Settat study area, the content varies between 0.031 and 0.055 mg / g. Comparing the content of mobile silicon found on each soil type, it can be said that mobile silicon is more abundant in isohumic soils (0.032 - 0.052 mg/g) and vertisols (0.027 - 0.054 mg/g) than on sesquioxide soils (0.016 - 0.042 mg / g) and calcimagnetic soils (0.028 - 0.037 mg / g).

Thus, a set of relationships between the mobile silicon content and certain soil parameters have been defined: negative correlations with pH and total limestone, which means that when these parameters decrease, the mobile silicon content increases, and a positive correlation with Mg^{2+} . However, other parameters are positively correlated with the mobile Si content depending on the soil classes: for the class of calcimagnetic soils, the class of iron sesquioxide soils and vertisols, we find a relation with the clay content, while for the class of isohumics, the mobile Si content is correlated with the Mg^{2+} content.

Key words: Silicon, wheat, soil class, ph, total limestone, magnesium, Settat, Meknes

ملخص

تشير العديد من الدراسات إلى أن السليكون عنصرًا مهمًا لنمو النباتات، خاصة الحبوب، على الرغم من أنه غير ضروري في التربة. ومن هنا يمكن أن يكون احتياطي السليكون المتوفر حيويًا في التربة عاملاً أساسياً لتحقيق غلات مثلى.

الهدف من دراستنا هو وصف حالة السليكون الموجود في التربة المغربية التي يتم فيها زراعة القمح الطري في كل من مكناس وسطات نظراً لتنوع تربتها. فإن نهجنا هو اختيار فئات معينة من التربة استناداً إلى صفات التربة. وهكذا تم تحديد أربع فئات *vertisols*، وتربة *calcimagnésiques* وتربة *isohumiques* وتربة *sesquioxides* الحديد.

للقيام بذلك، تم إجراء تحاليل فيزيوكيميائية لتحديد خصائص التربة، وكذلك لتحديد جزء من *Bioavailable* في هذه التربة. في نهاية هذه الدراسة، يجب أن يقال إن محتوى السليكون يختلف من منطقة إلى أخرى ومن طبقة تربة إلى أخرى. يتراوح محتوى السليكون المتنقل في منطقة الدراسة في مكناس بين 0.017 و 0.040 ملجم / جرام في حين يختلف محتوى الدراسة في منطقة سطات الدراسية بين 0.031 و 0.055 ملجم / جرام. وبمقارنة محتوى السليكون المتنقل الموجود في كل نوع من التربة، يمكن القول إنه أكثر وفرة في التربة *isohumique* (0.032 - 0.052 ملجم / جرام) و *vertisol* (0.027 - 0.054 ملغ / جرام) مقارنة بما هو عليه في تربة - (0.016 - *sesquioxide* 0.042 mg/g) والتربة *calcimagnésique* (0.028 - 0.037 mg / g).

وهكذا، تم تعريف مجموعة من العلاقات بين محتوى السليكون المتنقل وبعض معلمات التربة: الارتباطات السلبية مع الحمض النووي والحجر الكلسي الكلي، مما يعني أنه عند انخفاض هذه المعلمات، يكون محتوى السليكون المتنقل يزيد، وارتباط إيجابي مع Mg^{2+} ومع ذلك، ترتبط المعلمات الأخرى بشكل إيجابي مع محتوى Si المحمول تبعاً لفئات التربة: بالنسبة لفئة التربة *calcimagnésique*، طبقة تربة *sesquioxide* الحديد و *vertisols*، نجد علاقة مع محتوى الطين، بينما بالنسبة لفئة *isohumics*، يرتبط محتوى Si المحمول بمحتوى Mg^{2+} .

الكلمات المفتاح: السليكون والقمح ودرجة حموضة التربة والحجر الجيري الكامل، المغنيزيوم، سطات ومكناس.

ABRÉVIATION

Ag : Argile

Al³⁺ : Aluminium

Ca⁺⁺ : Calcium

CE : Conductivité Electrique

CEC : Capacité d'Echange Cationique

DSS : Direction de la Stratégie et des Statistiques

FAO : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FNM : Fédération Nationale de la Minoterie

H⁺ : Proton

Ha : Hectare

K⁺ : Potassium

MAMPDREF : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural, des Eaux et Forêts

Mg : Magnésium

MO : Matière organique

N : Azote

Na⁺ : Sodium

P : Phosphore

PIB : Produit Intérieur Brut

Qx : Quintaux

SAU : Superficie Agricole Utile

Si : Silicium

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Abréviation	VI
Table des figures	V
Liste des tableaux	VI
Introduction	1
Etude bibliographique	3
I. Filière céréalière marocaine	3
1. Introduction	3
2. Importance socio-économique des céréales au Maroc.....	3
3. Aperçu sur les céréales au Maroc	4
4. Répartition régionale.....	6
5. Répartition spatiale de la production des céréales	6
1. Propriétés physiques et chimiques du sol	7
II. La biodisponibilité du silicium dans le sol et son absorption par les plantes	12
1. Biogéochimie du silicium et biodisponibilité dans le sol	12
2. Absorption du silicium par les plantes.....	18
Matériels et Méthodes	25
I. Choix de la zone d'étude.....	25
II. Présentation des régions céréalières choisies.....	26
1. Région de Casablanca-Settat.....	26
2. Région de Fès Meknès	28
III. Cartes pédologiques utilisées	30

III. Traitement des données	31
IV. Identification des sols pour l'échantillonnage	34
1. Choix des sols selon les classes	34
2. Choix des sols selon les sous-classes, groupe ou sous-groupe	36
V. Travail du terrain	36
1. Choix des points de prélèvement via Google Earth.....	37
2. Prélèvement des échantillons de sol.....	39
3. Prétraitement des échantillons de sol : préparation de l'échantillon .	40
VI. Analyses physico-chimiques des sols	41
1. Analyse physique : Granulométrie.....	41
2. Analyse chimique.....	43
VII. Analyse du Silicium	46
VIII. Analyse statistique des données	48
Résultats et discussion.....	49
I. Présentation des résultats	49
1. Constituants physiques des sols étudiés.....	52
2. Caractérisation chimique des sols étudiés.....	52
3. Analyses statistiques	62
Conclusions et recommandations	79
Références	80

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Répartition de la superficie agricole utile (SAU) selon le type d'utilisation	3
Figure 2. Evolution des superficies des trois principales céréales (MAMPDREF, 2018).....	4
Figure 3. Evolution de production des trois principales céréales (MAMPDREF/DSS, 2018).....	5
Figure 4. Répartition de la production des principales céréales (MAMPM, 2018).....	6
FIGURE 5. Répartition spatiale de la production des trois céréales entre 2008 et 2015 (MAMPDREF/DSS, 2016)	7
Figure 6. Différentes fractions de Si dans le sol (Tubana et al., 2016).....	13
Figure 7. Cycle biogéochimique du silicium en milieu terrestre (Meunier et al., 2001).	16
Figure 8. Représentation schématique de l'absorption du silicium dans les cellules de l'exoderme ou de l'endoderme racinaire (Ma et al., 2011).	19
Figure 9. Représentation synthétique des différents effets du Si sur les plantes. (rectangle vert : stress biotique, rectangle jaune : stress abiotique) (Walgraffe, 2017)	24
Figure 10. Identification des provinces de Settat et Meknès à l'échelle nationale	26
Figure 11 : Part relative des superficies des cultures pratiquées dans la région de Casablanca-Settat (Monographie agricole de la région Casablanca-Settat, 2018)	27
Figure 12. Types de sol de la région de Casablanca-Settat (monographie de Casablanca-Settat, 2015)	28
Figure 13. Part relative des superficies des cultures pratiquées dans la région de Fès-Meknès (MAPMDREF, 2016).....	29
Figure 14. Evolution des rendements des céréales (blé tendre, blé dur et orge) à l'échelle nationale et dans la région de Fès-Meknès (MAPMDREF, 2016).....	29
Figure 15. Carte des types de sols de la région Fès-Meknès (monographie de la région Fès-Meknès, 2015)	30
Figure 16. Carte thématique des classes de sol de la zone nord de Settat.....	32
Figure 17. Carte thématique des classes de sol de Meknès.....	33
Figure 18. Pourcentage de superficie occupée par chaque classe de sol dans la zone d'étude de Settat.....	34
Figure 19. Pourcentages des superficies occupées par les classes de sol dans la zone d'étude de Meknès.	36
Figure 20. Choix des points d'échantillonnage sur l'image satellitaire (Settat)	37
Figure 21. Choix des points d'échantillonnage sur l'image satellitaire (Meknès).....	38
Figure 22. Carte des emplacements d'échantillons sélectionnés dans Google Earth (propre illustration).....	38
Figure 23. Schématisation du prélèvement du sol et des plantes	39
Figure 24. Matériels du prélèvement	39
Figure 25. Séchage des échantillons	40
Figure 26. Broyage et pilonnage de l'échantillon	41
Figure 27. Triangle textural.....	42
Figure 28. Méthode d'extraction pour chaque fraction de silicium.....	46
Figure 29. Variation du calcaire total selon les sols de settat (%)	57
Figure 30. Distribution de la CEC dans la région de Meknès (méq/100g).....	60
Figure 31. Distribution de la CEC dans la région de Settat (méq/100g).....	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Différentes sources d'engrais de silicium avec leur teneur totale en Si et leur composition chimique (Tubana et al., 2015).....	16
Tableau 2. Concentrations de silicium dans différentes plantes de cultures vivrières et produits dérivés.....	19
Tableau 3. Classification de différentes espèces végétales en fonction de l'accumulation de silicium	20
Tableau 4. Dimensions des classes texturales.....	42
Tableau 5. Interprétation du pH des sols (Soil survey report- ICARDA farm Marchouch, 2014)...	43
Tableau 6. Interprétation de la <i>CE</i> (1/5) des sols (Soil survey report – ICARDA Farm Marchouch, 2014)	43
Tableau 7. Classification des sols selon le pourcentage de calcaire ($CaCO_3$) (Soil survey report – ICARDA Farm Marchouch, 2014)	44
Tableau 8. Normes d'interprétation de la matière organique (Soil survey report – ICARDA farm Marchouch, 2014).....	44
Tableau 9. Normes pour la <i>CEC</i> en méq/100g du sol (Soil survey report – ICARDA Farm Marchouch, 2014).....	45
Tableau 10. Les sols échantillonnés dans la région de Settat	50
Tableau 11. Les sols échantillonnés dans la région de Meknès.....	51
Tableau 12. Résultats de la granulométrie des cinq classes de sols étudiés de Meknès.....	53
Tableau 13. Résultats de la granulométrie des cinq classes de sols étudiés de Settat	54
Tableau 14. Analyse de variance de la capacité d'échange cationique du sol.....	67
Tableau 15. Analyse de variance de si mobile du sol	67
Tableau 16. Analyse de variance du calcaire total du sol	68
Tableau 17. Matrice de corrélation pour la classe des sols calcimagnésiques.....	71
Tableau 18. Matrice de corrélation pour la classe des sols à sesquioxydes de fer	72

INTRODUCTION

La céréaliculture au Maroc constitue l'ossature de l'agriculture nationale. Sa superficie totalise plus de 5 millions d'hectares : soit plus de 75 % de la superficie agricole utile (SAU) totale dont 90 % des superficies sont en « Bour » (Tahhar, 2015). Ces zones, dites pluviales, sont particulièrement sensibles à la sécheresse vu l'irrégularité pluviométrique.

Cependant, les enjeux liés à cette filière céréalière sont considérables du fait de leur poids dans l'alimentation de la population, dans l'agriculture et dans l'ensemble de l'économie marocaine (Jouve et al., 1995).

Sur la base des connaissances actuelles documentées dans la littérature, il est avéré que le Silicium (*Si*), considéré comme élément non essentiel, a une signification pour la vie des plantes et la performance des cultures en stress hydrique (Bartoli et Souchier, 1978). En effet, le *Si* est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (Ma et Yamaji, 2006). Il est très présent dans le sol, mais sous forme de SiO_2 , non disponible à la plante. Sa forme soluble est l'acide ortho-silicique $Si(OH)_4$, très peu présente dans le sol (Bouzoubaâ et al., 2009).

En Europe, Asie et Amérique, certains auteurs pensent que l'épuisement du *Si* biodisponible des sols pourrait constituer une des causes de la stagnation des rendements observés dans certains pays. C'est pourquoi le *Si* est utilisé comme fertilisant dans des rizières (Liang et al., 2015).

Cependant, en Afrique et notamment au Maroc, les recherches les plus récentes sur le *Si* montre qu'il est devenu un levier minéral important pour une agriculture durable (Bouzoubaâ et al., 2009).

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude intitulée : « *Evaluation de la biodisponibilité du silicium dans les sols marocains soumis à la culture de blé tendre en Bour* », et dont l'objectif principal consiste à faire un état des lieux du *Si* biodisponible dans les différents types de sols marocains soumis à la culture de blé tendre en « Bour ».

Etant donné qu'il existe plusieurs régions productrices de blé au Maroc, notre étude s'est concentrée sur deux régions caractérisées par une production élevée. Par la suite, nos résultats peuvent être extrapolés sur différents types de sols marocains.

Le présent document est structuré autour de trois principales parties : une première partie consacrée à la revue bibliographique, synthétisant l'ensemble des études réalisées sur la filière céréalière au Maroc, et la biodisponibilité du *Si* dans le sol et son absorption par la plante. La deuxième partie est dédiée à la méthodologie adoptée et au matériel utilisé dans l'étude. Enfin, une troisième partie qui présentent l'ensemble des résultats obtenus et leurs analyses.

Etude bibliographique

I. FILIÈRE CÉRÉALIÈRE MAROCAINE

1. INTRODUCTION

La filière céréalière marocaine demeure le premier pourvoyeur de l'économie du pays. Par la diversité de ses métiers, elle occupe aujourd'hui une place importante dans les équilibres nationaux, tant en termes de création de valeur et d'emploi que de développement durable et de réponse aux besoins alimentaires (MAMPDREF/DSS, 2016).

Les céréales constituent la principale spéculatation adoptée par l'ensemble des agriculteurs et c'est ainsi qu'elles représentent l'un des principaux secteurs de production agricole du pays. Elles constituent la part la plus importante en terme d'occupation du sol au Maroc, surtout en zones « Bour » (Nouijai et al., 2011).

Les céréales représentent 59 % de la superficie agricole utile (SAU), ce qui rend l'agriculture faiblement diversifiée (Figure 1). D'où la vulnérabilité aux aléas climatiques avec toutes ses conséquences sur la variabilité de la production et la croissance du secteur (MAMPDREF/DSS, 2018).

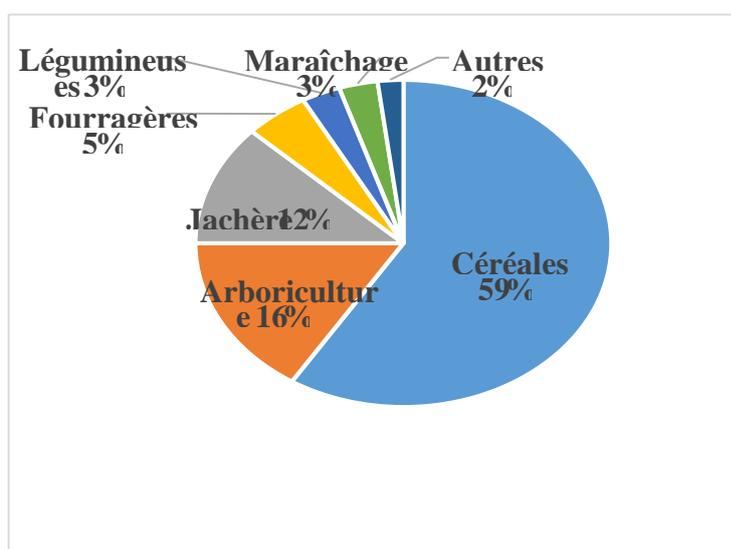


Figure 1. Répartition de la superficie agricole utile (SAU) selon le type d'utilisation

2. IMPORTANCE SOCIO-ECONOMIQUE DES CEREALES AU MAROC

La céréaliculture joue un rôle multiple en ce qui concerne les emblavements annuels des terres cultivables, la formation du produit intérieur brut agricole, l'emploi dans le milieu rural et l'utilisation des capacités de transformation industrielle (MAMPDREF/DSS, 2016).

Elle occupe une place déterminante dans l'économie agricole et ce, à plusieurs niveaux (Tahhar, 2015) :

- ✓ Importance agronomique et économique majeure, selon le rapport annuel de FNM (Fédération Nationale de la Minoterie) en 2012 :
 - 75 % de la superficie agricole utile (hors jachère) ;
 - 10-20 % du produit agricole brut (*PIB*) agricole avec de fortes fluctuations en fonction de la pluviométrie ;
 - Environ 70 % des importations agricoles (près de 8 Milliards de dirhams en 2012), ce qui aggrave le déficit de la balance commerciale.
- ✓ Poids social majeur pour un tissu de producteurs fragiles :
 - Culture prédominante pour la quasi-totalité des exploitations agricoles.
- ✓ Importance primordiale dans la consommation :
 - Consommation humaine très élevée avec une autoconsommation atteignant près de 30 % des volumes produits ;
 - Forte contribution dans la consommation animale (orge, maïs, paille, chaume, sous-produits de la transformation des céréales, etc.) engendrant des interdépendances très marquées entre les cultures céréalières et l'élevage.

3. APERÇU SUR LES CEREALES AU MAROC

3.1. Superficie

La superficie moyenne emblavée par les trois principales céréales (Blé tendre, Orge, Blé dur) a varié entre 800 et 2 400 mille *ha* entre 2007 et 2017 (Figure 2). Ces cultures sont pratiquées en assolement avec les légumineuses, les cultures industrielles et les cultures fourragères dans les différentes zones agro-climatiques du pays (*MAMPDREF/DSS*, 2016).

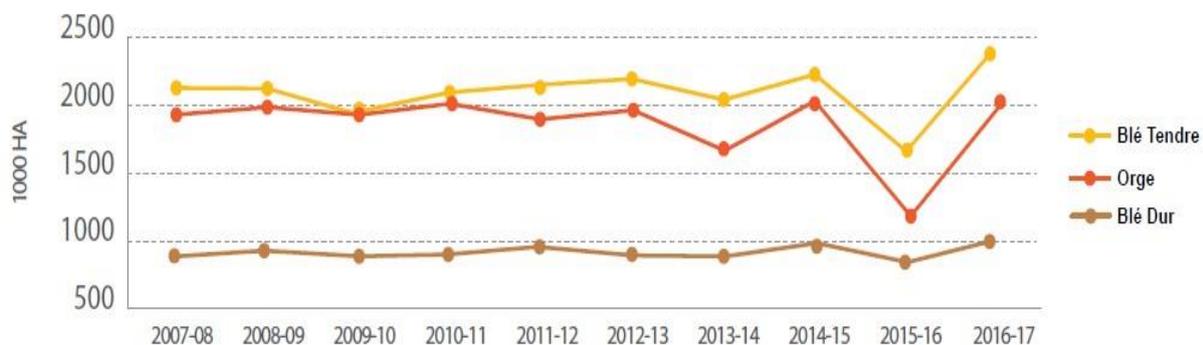


Figure 2. Evolution des superficies des trois principales céréales (*MAMPDREF*, 2018)

Le mode de conduite de ces cultures n'a pas connu de bouleversements majeurs depuis 2000 jusqu'à 2015, les céréales sont ainsi toujours cultivées dans les zones « Bour » à hauteur de 90 % (MAMPDREF/DSS, 2016) avec 50 % dans les régions arides et semi-arides (Tahhar, 2015).

3.2. Production

La production est extrêmement variable car elle est fortement corrélée à la pluviométrie moyenne nationale. A titre d'exemple, la campagne 2015/2016, caractérisée par un déficit hydrique particulier, n'a produit que 33.4 millions de quintaux (Qx) contre 110 millions lors de la campagne 2014/2015, d'où une forte baisse de 70 % (Djama, 2016).

Cependant, avec un total de 96 millions de Qx au titre de la campagne agricole 2016/2017, la production céréalière s'est établie à des niveaux élevés car elle a connu une bonne répartition temporelle des précipitations avec un cumul pluviométrique national de 327 mm (Journal 2m, 2017).

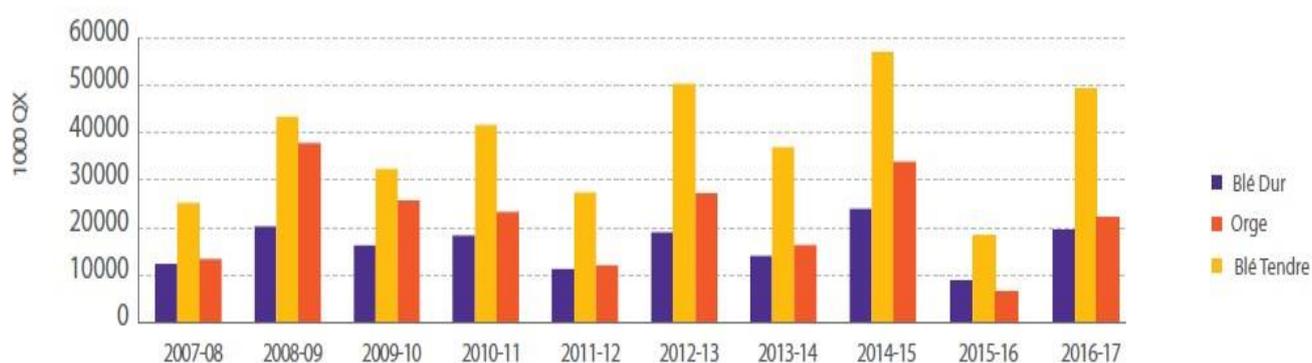


Figure 3. Evolution de production des trois principales céréales (MAMPDREF/DSS, 2018)

Ainsi, l'engagement continu du département de l'agriculture depuis 2008 en faveur des agriculteurs a permis de réussir la campagne céréalière 2016/2017, notamment à travers l'encouragement de l'utilisation des semences certifiées, des engrais et de la mécanisation et donc en diffusant une nouvelle vague de progrès au sein des exploitations agricoles avec des impacts durables sur la productivité (Campagne céréalière 2016-2017, 2017).

3.3. Focus sur la production céréalière de la campagne 2017-2018

La production des céréales de la campagne agricole 2017/2018 a atteint un niveau exceptionnel de 103 millions de Qx sur une superficie de 4.5 millions d' ha , une récolte qui dépasse de 7.3 % les performances de la campagne 2016/17 qui a été réalisé sur une superficie de 5.4 millions d' ha (MAMPM, 2018).

Par espèce des principales céréales, la production définitive est répartie comme suit (Figure 4) :

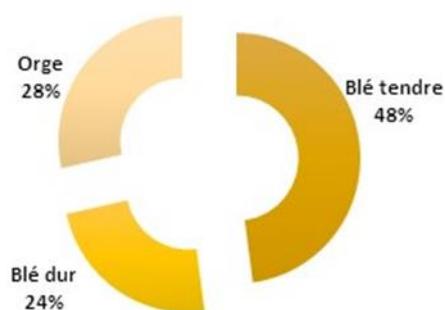


Figure 4. Répartition de la production des principales céréales (*MAMPM, 2018*)

Cette réduction de la superficie céréalière est due à l'arrivée très tardive des pluies d'automne ayant fortement raccourci la période des semis. En dépit de ce démarrage difficile, la campagne a pu profiter des efforts techniques et technologiques ayant apporté de grandes avancées de performance des itinéraires techniques promus par le Plan Maroc Vert (*MAMPM, 2018*).

4. RÉPARTITION RÉGIONALE

L'aire géographique des céréales s'étend à toutes les zones et ne semble être limitée que par la disponibilité de la terre et la contrainte hydrique. Toutefois, la répartition régionale de la production céréalière selon le découpage territorial montre que la région du Grand Casablanca-Settat est la première région productrice de céréales avec une part de 22.6 %, suivie de Marrakech-Safi, Fès-Meknès, Béni Mellal-Khénifra et Rabat-Salé-Kénitra avec respectivement de 18,9 %, 17.4 %, 12.3 % et 12.2 %. Ces quatre zones contribueraient à plus de 86 % de la production nationale (*MAMPDREF/DSS, 2016*).

5. REPARTITION SPATIALE DE LA PRODUCTION DES CEREALES

L'analyse établie entre les deux périodes 2000-2007 et 2008-2017 montre que la part des provinces à vocation céréalière a été renforcée ou stabilisée tel est le cas de Settat, Taounate, Khémisset, Safi, Béni Mellal, El Jadida, Sidi Kacem, Sidi Bennour et Fès. Entre 2000 et 2007, la part de ces provinces a représenté 41 % de la production nationale. Après 2008, leur part a dépassé 51 %. Ce résultat témoigne d'une vocation spatiale réussie, pensée autour des plans agricoles régionaux initiés par le Plan Maroc Vert. Les taux de rendement durant les dernières années ont également augmenté d'une manière significative, bénéficiant des programmes d'intensification lancés par le département de l'agriculture. En effet, le rendement du blé dur est passé de 13 *Qx/ha* (moyenne 2000-2007) à 17,8 *Qx/ha* (moyenne 2008-2017). Celui du blé tendre est passé de 14,2 à 18,7 *Qx/ha*, tandis que le rendement de l'orge est passé de 8,2 à 11,9 *Qx/ha* (*Tali, 2018*)

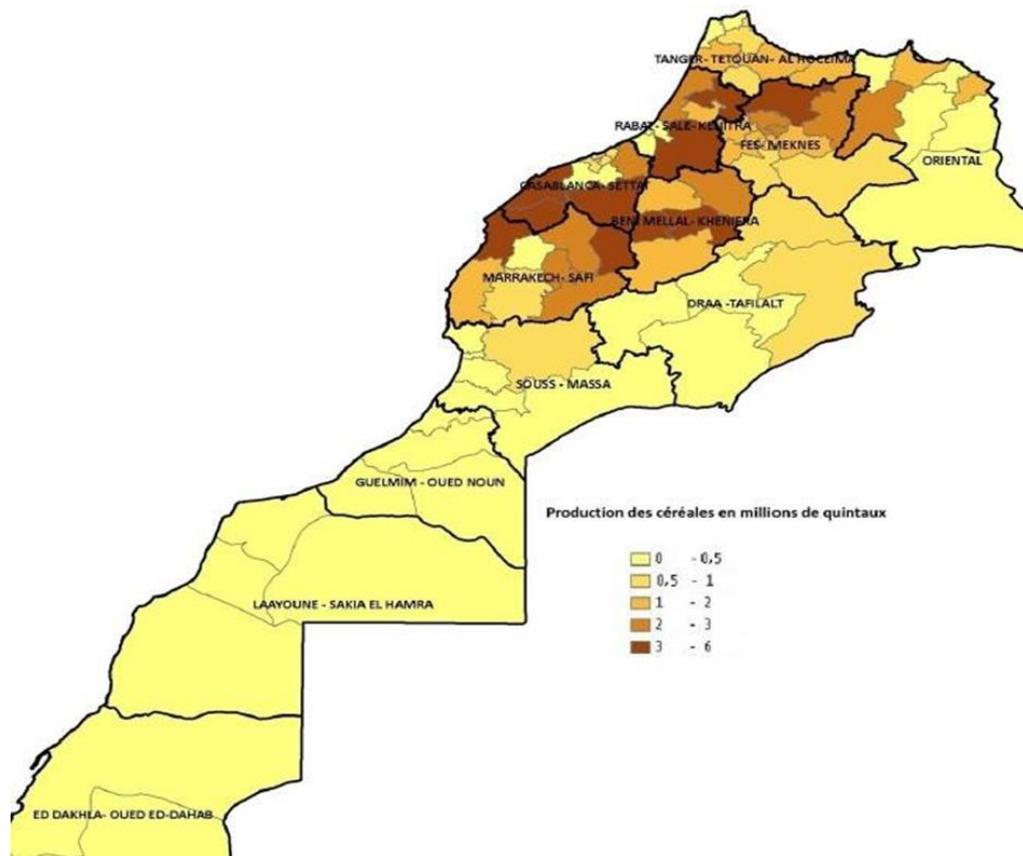


FIGURE 5. Répartition spatiale de la production des trois céréales entre 2008 et 2015
(MAMPDREF/DSS, 2016)

1. PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU SOL

Le sol est une entité dynamique où se produisent des interactions complexes entre composants biologiques, chimiques et physiques. Tous ces composants et propriétés déterminent le fonctionnement du sol pour des fins différentes. Ce fonctionnement est inclus dans le concept de « qualité du sol » (Delgado et Gomez, 2016).

La chimie des sols est dominée par l'interaction entre ses composants solides et sa phase aqueuse et gazeuse. Pour un sol donné, ses propriétés dépendent de l'historique de la formation du sol et peuvent être substantiellement modifiées par une intervention humaine (par exemple les pratiques agricoles).

1.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du sol déterminent de nombreux processus clés du sol, et donc le potentiel agronomique d'un sol.

La texture du sol est la distribution granulométrique des particules minérales du sol composant la fraction solide du sol (argile, limon et sable) (Delgado et Gomez, 2016). Or, la texture joue un rôle majeur vis-à-vis de :

- La richesse du sol, en effet un sol sableux est pauvre en éléments nutritifs et possède une faible capacité d'échange cationique contrairement au sol argileux.
- La stabilité structurale et la résistance à l'érosion, en effet les sols riches en limons sont sensibles à la battance. Cependant, la tendance à la battance peut être corrigée par une teneur suffisante en humus et en calcium, éléments favorables à la stabilisation des agrégats.

Ainsi, la granulométrie est une caractéristique stable du sol, définie comme la distribution statistique des tailles d'une composition centésimale du sol en sables, limons et argile, déterminée par l'analyse granulométrique au laboratoire. Elle a un rôle important dans l'organisation de la structure du sol. En particulier, la proportion d'argile dans un sol favorise la formation du complexe argilo-humique, les échanges d'ions, la fertilité et la profondeur d'enracinement (Baize et Jabiol, 2011).

1.2. Propriétés chimiques

a) pH

Le pH du sol est celui de la solution du sol en équilibre avec les protons (H^+) retenus par les colloïdes du sol (*argile*, matières organiques, oxydes). Le degré d'acidité ou d'alcalinité d'un sol est une propriété très importante qui affecte de nombreuses autres propriétés physicochimiques et biologiques.

Les problèmes liés aux sols acides ou à l'acidification des sols agricoles peuvent être surmontés en augmentant la saturation en bases et le pH avec des amendements de sol (chaulage). Quant aux sols basiques ou alcalins, ils sont la conséquence du tamponnage du pH du sol par des bases échangeables ou par la présence de composés tampons tels que des carbonates (Delgado et Gomez, 2016).

Ce pouvoir tampon est la capacité que présente le sol de résister aux variations du pH. C'est une propriété liée à la capacité d'échange du complexe absorbant, qui est due à la matière organique et à l'argile. Un sol très sableux dépourvu de matière organique et d'argile est donc pratiquement sans pouvoir tampon (Combeau et al., 1970)

b) Conductivité électrique

La salinité est définie comme une concentration élevée de sels solubles (plus solubles que le gypse) dans les sols. Un sol salin a une concentration en sel soluble suffisamment élevée pour nuire à la croissance et au développement de la plupart des plantes cultivées. La classification des sols salins et l'évaluation des effets négatifs de la salinité sur les cultures sont basées sur la conductivité électrique qui est un indice des teneurs en sels solubles dans la solution du sol (Delgado et Gomez, 2016).

L'impact de la salinité sur la croissance des plantes est causé par des effets osmotiques (potentiel hydrique diminué dans le sol) et par une toxicité spécifique, généralement due à des concentrations élevées de Chlorure ou de Sodium.

La salinité menace la durabilité de nombreux systèmes agricoles, en particulier des zones irriguées des zones arides et semi-arides. Outre la toxicité spécifique éventuelle, le principal effet des sels est la réduction du potentiel osmotique du sol, qui entraîne un effet similaire à celui du déficit en eau.

c) Matière organique

Le statut organique du sol est généralement évalué par la mesure de la concentration totale de carbone organique ou de matière organique (*MO*) dans le sol ; la relation entre ces deux paramètres est donnée par l'équation : $MO = 1,724 \times CO$.

La *MO* du sol est très avantageuse vis-à-vis des autres propriétés physicochimiques du sol. Elle donne au sol une meilleure structure, favorise la porosité du sol, la bonne circulation de l'eau et de l'air, réduit les problèmes d'érosion par la création d'une bonne stabilité structurale (Donahue et al., 1983). Les sols riches en *MO* ont une résistance vis-à-vis de l'érosion hydrique (FAO, 1983 ; Nahal, 1975 ; Saroufim, 2007). La teneur du sol en éléments nutritifs est en partie liée à la richesse du sol en *MO* et de l'activité des microorganismes responsables de sa transformation (Eldor et Francis, 1989).

d) Calcaire total

La présence de calcaire confère au sol des caractéristiques spécifiques en termes de comportement physique et chimique et influe sur son activité biologique. Son absence totale a pour conséquence une acidification progressive, plus ou moins rapide suivant le contexte pédoclimatique, qu'il est nécessaire de compenser par des apports réguliers d'amendements basiques (chaulage). Le calcaire actif est la fraction du calcaire total susceptible de se dissoudre facilement et rapidement dans la solution du sol. Elle permet de maintenir une saturation calcique élevée de la capacité d'échange de cations (*CEC*) et, indirectement, un pH basique stable.

La présence d'un niveau de calcaire actif - non adapté aux végétaux - peut induire, dans certains sols pauvres en fer libre, un risque de chlorose ferrique, auquel certaines productions sont sensibles en bloquant l'assimilation du fer par la plante. C'est le cas en horticulture (fraise par exemple), en arboriculture ou en viticulture. Dans certains cas, il peut être utile de doser, dans le même extrait, la teneur en fer, ce qui permet de calculer l'indice de pouvoir chlorosant (diagnostic essentiel pour le choix du porte-greffe en viticulture).

e) Capacité d'échange de cations

Le sol présente la propriété d'échanger de manière réversible, soit des cations soit des anions. L'échange des cations est certainement le plus important (Combeau et al., 1970).

La capacité d'échange de cations d'un sol est mesurée en tant que quantité de cations (équivalents ou moles de charge) pouvant être extraite par une solution de cations hautement concentrée. La *CEC* est généralement dominée par Ca, Mg, Na, K, Al et les H^+ (Delgado et Gomez, 2016).

Un certain nombre de facteurs ont une influence marquée sur la capacité d'échange, à savoir : la nature des constituants et leur taille, le pH, la nature des cations et des anions (Combeau et al., 1970) :

- **Les constituants** : la capacité d'échange est une propriété de la surface des particules. Elle est donc d'autant plus forte que la taille diminue. Les sables et les limons n'ont donc qu'une capacité d'échange très réduite, sauf dans certains cas où ces fractions renferment des produits en cours d'altération. Or, pour les produits amorphes contenant de la silice, de l'alumine et du fer, ils ont une capacité d'échange très élevée et variable selon que le milieu est acide ou alcalin.
- **Le pH** auquel on mesure la capacité d'échange a une importance très nette. Au-dessous de pH 6, la capacité d'échange a une valeur généralement stable. On l'attribue à ce qu'on appelle la charge permanente qui est due aux substitutions dans les réseaux (montmorillonite, vermiculite). Au-dessus de pH 6, la capacité d'échange augmente avec le pH, c'est la charge variable. Elle est attribuée aux effets de bordure et à la dissociation des hydroxydes (kaolinite).

Les variations du pH sont beaucoup plus marquées sur la matière organique que sur la matière minérale à partir de pH 6.

Il est donc difficile de comparer des capacités d'échange mesurées à des pH différents. Il y a donc lieu de constater que la mesure, qui a forcément un caractère conventionnel, doit être effectuée avec une même technique, pour que les valeurs soient comparables.

- **La nature du cation** que l'on fait intervenir dans la mesure de la capacité a une influence sur celle-ci. En principe, un cation monovalent neutralise une charge ; l'expérience prouve qu'un cation divalent ne suffit pas pour neutraliser deux charges, sans doute en raison de l'éloignement de celles-ci. L'intervention de potassium dans la mesure, peut provoquer, s'il y a de l'illite, la fermeture des feuillets et le blocage de certaines positions d'échange. La présence d'hydroxydes amorphes provoque également un blocage de certaines positions et une diminution de la capacité d'échange. Par conséquent, la nature de l'ion employé n'est pas indifférente.

f) Azote

L'azote existe dans le sol sous forme organique et minérale, il est très dynamique dans le sol, car il change d'une forme à une autre.

Généralement, l'azote minéral existe dans le sol en quantité inférieure à 2 % de l'azote total du sol et varie très largement d'un sol à un autre selon le type de climat. Dans les zones humides et tempérées, l'azote minéral dans les horizons supérieurs du sol est faible en hiver, il augmente au printemps et en été avec l'augmentation de la température et diminue avec les précipitations qui le déplacent aux horizons inférieurs (Harmsen et Kolenbrander, 1965). L'ammonium et les nitrates sont les deux formes d'azote que la plante peut absorber, l'ammonium est issu de la dégradation de l'azote organique par le processus de minéralisation. Environ 2 à 3 % de l'azote organique est converti annuellement en ammonium, qui peut se transformer à son tour en nitrates puis en nitrites par le processus de nitrification (Mengel et Kirby, 1982).

g) Phosphore et potassium

Le phosphore existe dans le sol sous différents états : phosphate en solution (HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^-), de P adsorbé, P organique et P dans les minéraux du sol. L'ion phosphate est la seule forme que la plante peut absorber. Cependant, la plupart des sols agricoles contiennent moins de 1 mg/l (1 ppm) de phosphate en solution, ce qui représente beaucoup moins que 1% du P total du sol. Le P organique consiste en P de la matière organique et représente entre 25 et 65% de P total du sol de surface alors que le P minéral (tel que les minéraux phosphatés calciques) et le P adsorbé représentent le reste.

Le potassium existe dans le sol sous forme d'ion K^+ dissout (K^+ de la solution du sol), K^+ échangeable, K^+ non-échangeable et K^+ minéral. Les plantes ne peuvent absorber que K^+ de la solution du sol, cependant les concentrations de K^+ dans la solution du sol est de 1 à 10 mg/l (ppm) seulement. Le K disponible pour la plante inclut K de la solution du sol et K échangeable. K^+ de la solution du sol existe en équilibre avec K échangeable K non-échangeable et K minéral. Contrairement à N et P, K n'est pas incorporé dans la structure de la plante, par conséquent, K n'est

pas lié dans des formes organiques, mais il est rapidement libéré dans le sol, les résidus et les racines de cultures et par les amendements organiques apportés au sol (Moughli, 2015).

II. LA BIODISPONIBILITE DU SILICIUM DANS LE SOL ET SON ABSORPTION PAR LES PLANTES

1. BIOGEOCHIMIE DU SILICIUM ET BIODISPONIBILITE DANS LE SOL

Le *Si* n'a jamais existé à l'état natif ou libre dans la nature. Il se présente sous la forme de silice ou de silicates complexes dans les roches, le sol, l'eau et l'atmosphère (Steiner, 1999). La biodisponibilité du *Si* dans les sols est étroitement liée à sa biogéochimie dans le sol.

1.1. Caractéristiques chimiques du silicium

Le *Si* de numéro atomique 14 et de masse molaire 28.0855g/mol, possède quatre électrons externes de valence et des états d'oxydation de +2, +4 et -4 avec son point de fusion à 1 410 °C et son point d'ébullition à 2 355 °C (Gascho, 2001).

Dans le tableau périodique des éléments, le *Si* est entouré d'éléments reconnus comme essentiels comme le bore, le carbone, l'azote (*N*), l'oxygène, le phosphore (*P*) et le soufre. Ainsi que d'autres qui sont considérés, tous comme le silicium, non essentiels ou bénéfiques, à savoir l'*Al*, le gallium, le germanium et l'arsenic (Liang et al., 2015).

1.2. Formes de silicium dans le sol

La teneur de *Si* dans la lithosphère est en moyenne 28 % alors qu'en sol, elle varie entre 25 et 35 % (Liang et Miroslav, 2015). La composition des fractions de composés de *Si* dans le sol est présentée à la figure 7 (Tubana et al., 2016)

a) Forme solide du silicium

La phase solide de *Si* consiste en des formes cristallines, formes amorphes et formes faiblement cristallines et microcristallines. La plus grande fraction en phase solide de *Si* se présente sous des formes faiblement cristallines et microcristallines, ainsi que sous des formes cristallines qui sont principalement sous forme de silicates primaires et secondaires et de silice. Quant à la forme amorphe, elle provient de matériaux biogéniques (résidus de plantes et de microorganismes) ou de matériaux litho/pédogéniques (complexes *Si* avec *Al*, fer, métaux lourds et *MO* du sol) (Matichencov et Bocharnikova, 2001). La quantité de *Si* amorphe varie typiquement de moins de 1 à 30 mg g⁻¹ sur la base totale du sol. Ainsi, la solubilité de *Si* dans la phase solide affecte de manière significative la concentration de *Si* dans la phase liquide (Jones, 1969 et Drees et al., 1989).

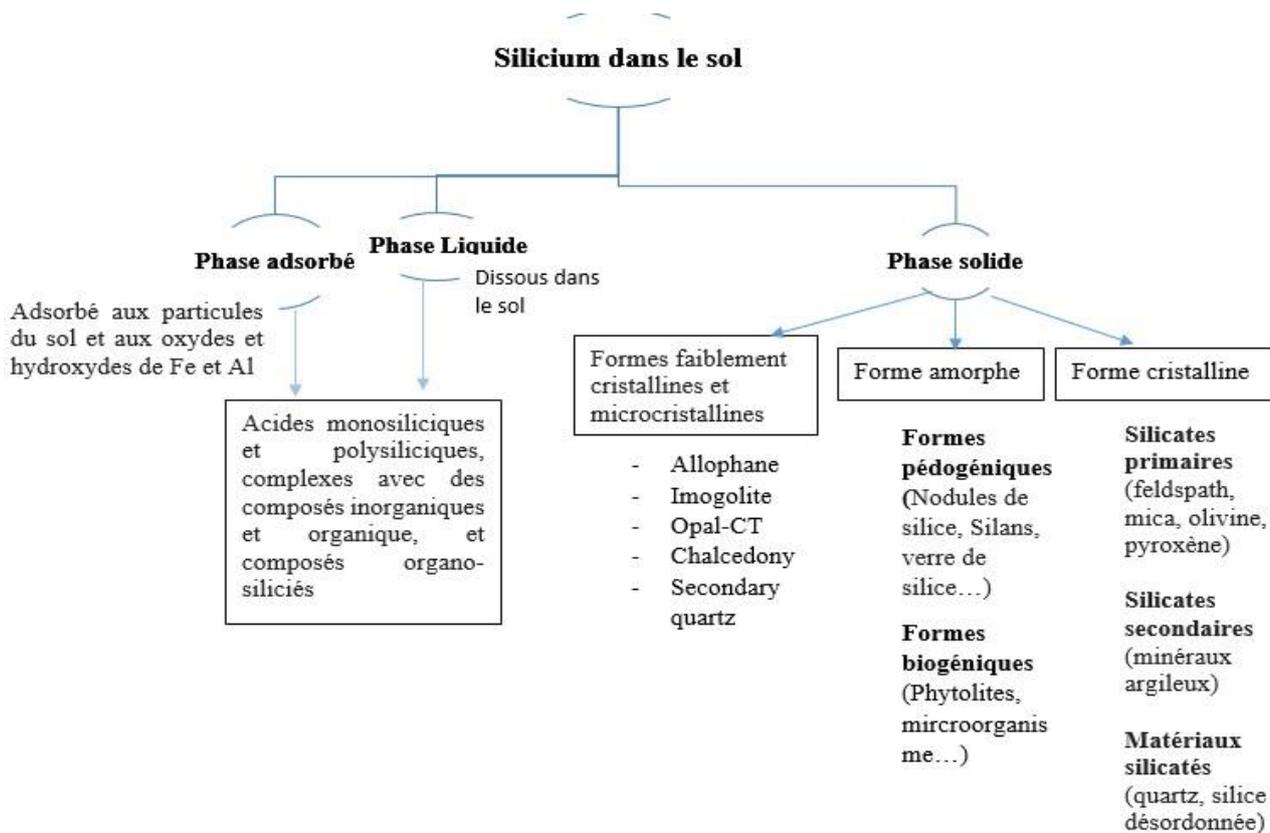


Figure 6. Différentes fractions de si dans le sol (Tubana et al., 2016)

b) Forme liquide du silicium et adsorbée

Les fractions de phase liquide et adsorbée de *Si* sont constituées de l'acide monosilicique (H_4SiO_4), ainsi que d'acides polysiliciques et du complexe de *Si* dissous avec des composés inorganiques et organiques. L'acide silicique se présentant sous la forme de monomère H_4SiO_4 est la forme de *Si* du sol disponible pour les plantes.

La polymérisation, processus par lequel des unités monomères d'acide silicique forment une chaîne, conduit à la formation de silice polymère ou de silice à poids moléculaire élevé (Williams et Crerar, 1985). Contrairement à l'acide monosilicique (H_4SiO_4), il n' a pas été démontré que l' acide polysilicique était disponible dans les plantes. Cependant, il peut relier les particules du sol par la création de ponts de silice, qui améliorent l'agrégation du sol et la capacité de rétention d'eau (Norton et al., 1984).

Le *Si* liquide et le *Si* adsorbé, ainsi que les formes amorphes de *Si* en phase solide, jouent un rôle important dans la dynamique des formes de *Si* disponibles dans les plantes et dans le sol.

1.3. Cycle biogéochimique du silicium

a) Stock minéralogique du sol

Le silicium (Si), est un métalloïde tétravalent et un élément ubiquiste. Le stock minéralogique représente la plus large fraction du silicium. Il est le second élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, avec un pourcentage massique moyen de 28,8% (Wedepohl, 1995). Il constitue, sous la forme de tétraèdres (SiO₄)⁴⁻, l'unité de base de nombreux minéraux primaires tels le quartz, les feldspaths, l'olivine, l'augite, la hornblende, les micas et secondaires tels les minéraux argileux. Ces minéraux, appelés silicates, sont pour la plupart insolubles et résistants à l'altération (Kovda, 1985). Ainsi, malgré cette abondance, le silicium est essentiellement présent sous une forme inerte et peu soluble (Savant et al., 1999).

b) Stock dissous dans le sol

L'acide orthosilicique ou monosilicique (H₄SiO₄), issu de l'altération des roches, est l'unique forme du silicium qui est totalement soluble dans l'eau et assimilable par la plante (Jones & Handreck, 1967). La concentration de l'acide orthosilicique dans la solution du sol est dynamique et se situe essentiellement entre 0,1 et 0,6 mM (Richmond & Sussman, 2003). Cette concentration est principalement contrôlée par la solubilité des différentes formes de silicium dans la phase solide (Drees *et al.*, 1989) ainsi que par le pH et les processus d'adsorption-désorption avec les minéraux du sol et plus particulièrement les sesquioxides (Jones & Handreck, 1967). Les autres principaux facteurs influençant la disponibilité en Si du sol incluent le type de sol et de matériau parental, le changement historique d'utilisation du sol, la texture du sol, le potentiel d'oxydo-réduction, la matière organique, la température, les autres ions présents dans la solution et le temps de séjour de l'eau interstitielle dans le sol (Liang & Miroslav, 2015).

c) Stock biologique

Le Si biogénique considéré comme le troisième stock de Si terrestre, est subdivisé en Si phytogène, microbien et protozoïque. Le Si phytogène est défini comme le Si qui précipite dans les racines, tiges, branches, feuilles ou aiguilles des plantes. Ces précipités sont appelés des phytolithes lorsqu'ils dépassent 5 µm de diamètre (Sommer et al., 2006), et constituent la composante majeure du stock de silice biogénique dans les sols (Meunier et Colin, 2001). La teneur moyenne en Si dans les phytolithes de plantes, d'après Blecker et al. (2006) est de 39.7 % en poids sec.

D'une part, lorsque la plante meurt et les feuilles chutent, les phytolithes retournent au sol et entrent dans le stock biogénique (Van Cappellen, 2003), et d'autre part, ce recyclage permet le contrôle du

flux hydrologique de l'acide monosilicique (Cornelis et al., 2010). Ce cycle biogéochimique du Si en milieu terrestre est représenté sur la figure 8

d) Implication du cycle du silicium dans le climat global

Le silicium joue un rôle très important dans le cycle global du carbone (Tréguer & Pondaven, 2000). Il influence ce cycle à travers deux mécanismes : les processus d'altération et les flux de Si vers les océans.

Au cours de l'altération des silicates, le CO₂ dissout dans la solution du sol est consommé pour libérer de l'acide orthosilicique (H₄SiO₄) de la structure cristalline des minéraux (Berner *et al.*, 1983). Le CO₂, alors transformé en ion bicarbonate (HCO₃⁻) au cours de la réaction, est stocké après une chaîne de transports et de processus complexes, sous forme de carbonates dans les biogéosystèmes marins (Berner *et al.*, 1983). L'altération des silicates représente donc un puits important pour le CO₂ atmosphérique sur une échelle de temps géologique et exerce une grande influence sur le climat global (Berner *et al.*, 1983).

D'autre part, le rôle des océans dans la séquestration globale du carbone est couplé avec le cycle global du silicium (Treguer *et al.*, 1995). En effet, les diatomées (Bacillariophyceae), qui ont besoin de silicium pour construire leur frustule, constituent 50% de la biomasse océanique actuelle (Tréguer & Pondaven, 2000). Ainsi, plus l'apport de silicium aux océans est important, plus le flux d'exportation du carbone vers les sédiments marins est important, signifiant une plus grande élimination du carbone du stock atmosphérique (Sommer *et al.*, 2006). Actuellement, approximativement 5 Tmol Si/an est fourni des continents par les rivières, ce qui équivaut à 80% des flux totaux vers les océans (Treguer *et al.*, 1995) ; les 20% restants proviennent des poussières et de sources hydrothermales sous-marines.

Ainsi, les écosystèmes terrestres impactent fortement le cycle biogéochimique océanique à travers l'absorption, le stockage et le recyclage du silicium (Conley, 2002). Cependant, le contrôle biologique des exportations de silicium dissout à partir des bassins versants n'a commencé à susciter l'attention des scientifiques que récemment (Smith *et al.*, 2009).

Une représentation du cycle biogéochimique global du silicium est disponible à la figure 8 :

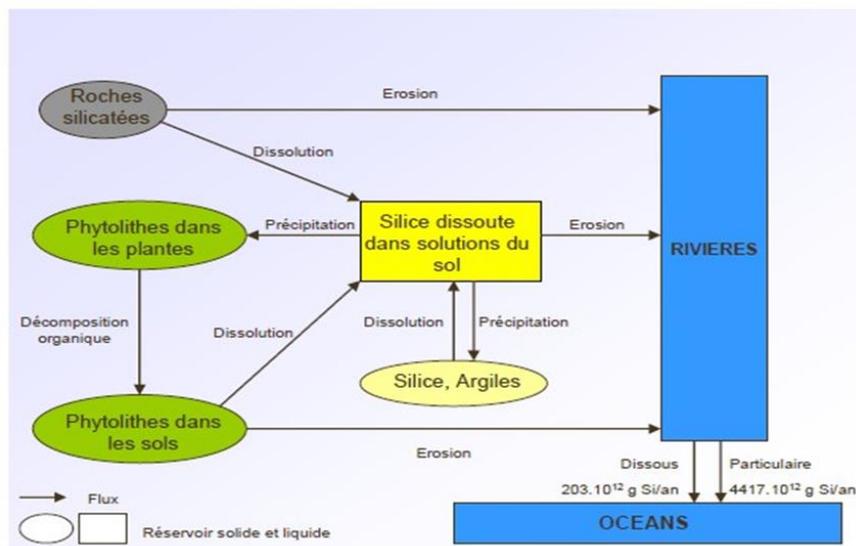


Figure 7. Cycle biogéochimique du silicium en milieu terrestre (Meunier et al., 2001).

1.4. Fertilisation silicatée

L'utilisation du silicium dans les pratiques agricoles remonte aux années 1950 au Japon (Takahashi *et al.*, 1988). L'application de silicium a eu pour conséquence d'augmenter la production du riz dans les rizières dégradées (Liang & Miroslav, 2015). En raison de son comportement non-toxique et de son abondance dans la nature, le silicium a reçu des agronomes une attention grandissante. De nombreux fertilisants à base de silicium sont maintenant communément utilisés dans de nombreux pays tels que les Etats-Unis, la Corée du Nord, la Corée du Sud et la Chine (Liang & Miroslav, 2015). Ces fertilisants ont pour la plupart un pH neutre ou faiblement alcalin, ce qui peut en outre contribuer à neutraliser les effets de l'acidité du sol (Savant *et al.*, 1999). D'autre part, certaines plantes les plus cultivées dans le monde comme le riz (*Oryza sativa* L.), le froment (*Triticum aestivum* L.) ou encore la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) sont considérées comme accumulatrices de silicium (Tubana *et al.*, 2016), traduisant le fait qu'elles ont développé une stratégie d'utilisation et de valorisation de cet élément. Ceci justifie les nombreuses recherches menées sur le Si aux 20^{ème} et 21^{ème} siècles.

Tableau 1. Différentes sources d'engrais de silicium avec leur teneur totale en Si et leur composition chimique (Tubana et al., 2015)

Source	Composition chimique	Teneur en silicium (%)	Références
Acide silicique	H ₄ SiO ₄	36	Sebastien et al., 2013
Sable du quartz	SiO ₂	46	Meena et al., 2014
Silicate de potassium	K ₂ SiO ₃	18	Meena et al., 2014
Silicate de sodium	Na ₂ SiO ₃	23	Meena et al., 2014
Silicate de calcium	Ca ₂ SiO ₃	24	Meena et al., 2014

Dans les systèmes agricoles, le *Si* est généralement appliqué au sol ou directement sur les feuilles sous forme de pulvérisation. Cependant, il existe aujourd'hui de nombreuses preuves que le *Si* appliqué au sol conduit à une accumulation de *Si* significativement plus importante dans les tissus végétaux que l'application foliaire et permet de mieux contrer les stress abiotiques et biotiques (Liang et al., 2005 ; Guével et al., 2007 ; Liang et Miroslav, 2015).

Malgré l'accumulation de preuves scientifiques des bienfaits du *Si* en agriculture, l'utilisation de fertilisants à base de *Si* est encore mal comprise en raison des nombreuses subtilités entourant les propriétés du *Si*, son absorption et son efficacité (Liang et Miroslav, 2015).

1.1. Silicium et propriétés du sol

Parmi les principaux facteurs influençant la disponibilité en *Si* du sol, on trouve le type de sol et sa texture, la *MO* et les autres ions présents dans la solution (Liang & Miroslav, 2015).

a) pH du sol

La teneur en *Si* disponible dans le sol est étroitement corrélée avec le pH du sol (Liang et al., 2015). La concentration d'acide monosilicique est faible lorsque le pH du sol varie entre 8 et 9. En dessous ou au-dessus de cette valeur, la concentration augmente de manière significative (Beckwith et Reeve., 1963).

Dans les sols acides, la teneur en *Si* disponible dans le sol augmenterait avec l'accroissement du pH, de la *MO* et de la teneur en *Ag* (Lian, 1976 ; He et al., 1980 ; Qinet et al., 2012).

b) Texture du sol

Les sols à texture légère ou sableuse présentent généralement une carence en *Si* disponible et ont un faible pouvoir d'approvisionnement en *Si* contrairement aux sols à texture lourde ou argileuse qui ont suffisamment de *Si* (Liang et Miroslav, 2015). Ainsi, la fraction du sable contient principalement le quartz (SiO_2), qui est très résistant à la dégradation chimique. Pour cette raison, les sols sableux sont plus sensibles que les sols argileux à la fertilisation au silicium (Demattê et al., 2011).

La teneur en *Si* disponible dans le sol est positivement corrélée avec la teneur en argile dans les sols (Wan et al., 1993 ; Zhang et al., 1996 ; Dai et al., 2004), car les minéraux argileux du sol à surface spécifique élevée ont une grande capacité à adsorber les silicates.

c) Matière organique

Certains auteurs s'accordent sur le fait que la teneur en *Si* disponible dans le sol est en corrélation positive avec la teneur en *MO* du sol (Lian., 1976 ; Shen et al., 1994; Yu et al., 1998 ; Qin et al., 2012), alors que d'autres ont rapportés qu'il existe une relation faible voire négative entre la teneur en *Si* disponible dans le sol et la teneur en *MO* (Zang., 1987 et Wan et al., 1993).

2. ABSORPTION DU SILICIUM PAR LES PLANTES

2.1. Types d'absorption

Takahashi et al., (1990) ont proposé trois types d'absorption de *Si* pour les plantes supérieures évalués en fonction de l'absorption d'eau :

- **Active** : absorption de *Si* est plus rapide que l'absorption de l'eau, ce qui entraîne une diminution de la concentration en *Si* dans la solution du sol et donc un appauvrissement significatif.
- **Passive** : absorption de *Si* à un taux similaire à l'absorption d'eau, ainsi la concentration en *Si* dans la solution reste inchangée ;
- **Rejetée** : absorption de *Si* est plus lente que celle de l'eau, ce qui entraîne une concentration croissante de *Si* dans la solution du sol.

2.2. Transporteurs responsables de silicium

Les différents transporteurs responsables du transport actif du *Si* ont été beaucoup étudiés chez le riz (Richmond et Sussman, 2003). Deux transporteurs ont été identifiés : *Lsi1* et *Lsi2* (Ma et al., 2011). *Lsi1* est localisé dans la partie corticale des racines latérales fonctionnelles : il est responsable du prélèvement du *Si* de la solution du sol vers les cellules racinaires. D'où son fonctionnement comme un transporteur de rentrée du *Si* dans les plantes.

En revanche, *Lsi2* est un transporteur actif de sortie dont le fonctionnement nécessite de l'énergie ; il assure l'export du *Si* vers le xylème et maintient sa concentration dans les cellules du cortex racinaire à un niveau bas de telle sorte que l'absorption passive par *Lsi1* puisse se poursuivre (Ma et al., 2007).

Des transporteurs homologues à *Lsi1* ont été identifiés chez l'orge (*H. vulgare*) (Chiba et al., 2009), le maïs (*Z. mays*) (Mitani et al., 2009a), le blé (*T. aestivum*) (Montpetit et al., 2012), le concombre (*C. sativus*) (Wang et al., 2015b), la courge musquée (*C. moschata*) (Mitani et al., 2011) et le soja (*G. max*) (Deshmukh et al., 2013) et homologues à *Lsi2* chez l'orge, le maïs (Mitani et al., 2009) et la courge musquée (Mitani-Ueno et al., 2011).

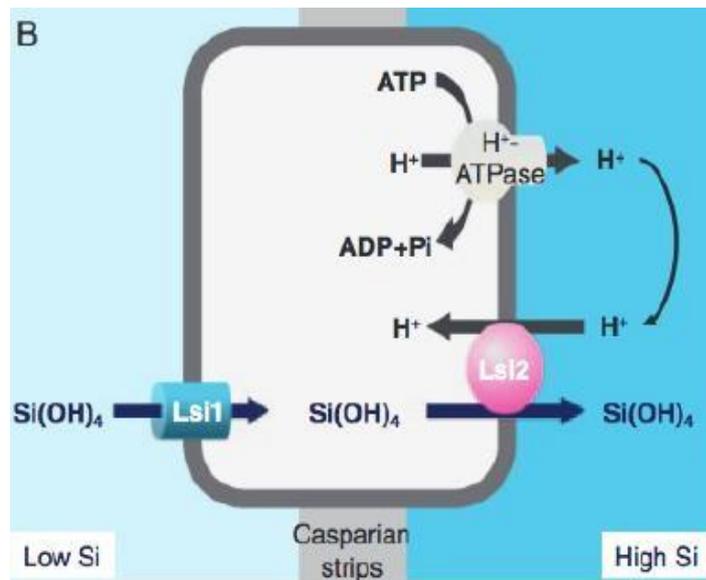


Figure 8. Représentation schématique de l'absorption du silicium dans les cellules de l'exoderme ou de l'endoderme racinaire (Ma et al., 2011).

2.3. Concentration de silicium dans les plantes

Toutes les plantes terrestres contiennent un peu de *Si* dans leurs tissus (Liang et al., 2015). Or, ils diffèrent par leur capacité à absorber le *Si* et ses concentrations varient même selon les génotypes appartenant à la même espèce dans leurs tissus (Ma et al., 2001). C'est ainsi que la concentration de *Si* dans les tissus varie considérablement entre les espèces végétales (de 0,1 à 10% *Si* sur poids sec) (Hodson et al., 2005).

L'accumulation du *Si* diffère selon la capacité des racines à absorber cet élément (Ma et Yamaji., 2006). Sur la base de la teneur en silicium dans les plantes, exprimée en pourcentage du poids sec de la partie aérienne, trois groupes majeurs de plantes ont été différenciés (Ma et Takahashi, 1991 ; Ma et al., 2007) comme il est montré dans le tableau 3.

Tableau 2. Concentrations de silicium dans différentes plantes de cultures vivrières et produits dérivés.

Espèce	Quantité de Silicium (mg/100g)	Référence
Riz brun	2.07	Price et al., 2013
Epinards	5.12	Meena et al., 2014
Son de blé	10.98	
Lentilles	4.42	
Pois chiche	0.76	
Haricots vert	2.44	
Raisins	0.49	

Meena et al., 2014

Tableau 3. Classification de différentes espèces végétales en fonction de l'accumulation de silicium

Accumulateur > 1.5 % silicium (Frantz et al., 2011)	Intermédiaire (0.5-1.5% silicium) (Pennington., 1991)	Non accumulateur < 0.5% silicium (Frantz et al., 2011)
Riz, Epinards, Fougères, Blé, Canne à sucre, , Orge	Citrouilles, Concombre, Guiné, Soja, Rose	Tomate, Muflier, Tournesol, raisins, pétunia

2.4. Effets du silicium sur les plantes

Le *Si* joue un rôle important dans la défense des plantes contre les stress abiotiques incluant la toxicité des métaux, la sécheresse, la salinité et les déséquilibres nutritifs et les stress biotiques incluant les insectes et les pathogènes (Liang et Miroslav, 2015).

2.4.1. Stress abiotiques

➤ Les métaux en excès

Depuis toujours, les éléments-traces métalliques constituent une source de contamination des sols à cause des activités anthropiques. Cette pollution du sol peut affecter physiologiquement les plantes en diminuant leur biomasse et leur activité photosynthétique et en perturbant l'absorption des nutriments (McGinnity, 2015).

- **Fer**

Des études sur le riz suggèrent que l'application de silicium augmente l'habilité des racines à oxyder le fer, convertissant l'ion ferreux (Fe^{2+}) en ion ferrique (Fe^{3+}). Cette oxydation réduit l'absorption du fer, ce qui diminue sa toxicité (Ma et Takahashi, 2002). Pour des sols acides, il a aussi été proposé par Wallace (1993) que lors d'applications de silicium, augmentant la quantité d'anions (SiO_4^-) dans la solution du sol, des quantités équivalentes d'ions hydroxyles (HO^-) doivent être expulsées des racines pour augmenter l'absorption anionique, ce qui peut augmenter le pH de la rhizosphère et diminuer l'absorption du fer.

- **Aluminium**

Le *Si* et l'*Al* interagissent dans le sol pour créer des colloïdes d'aluminosilicates inertes, ce qui réduirait les concentrations phytotoxiques de l'*Al* dans la solution du sol (Li et al., 1996 ; Liang et al., 2007). Le *Si* pourrait aussi promouvoir la production d'exsudats phénoliques des racines qui chélatent l'*Al* libre résultant en une réduction de l'absorption par les racines de maïs (Kidd et al., 2001). Il a aussi été montré que l'aluminium peut être détoxifié par des mécanismes internes à la plante en formant des aluminosilicates dans l'apoplasme racinaire (Ryder *et al.*, 2003 ; Wang *et al.*, 2004) ou par séquestration dans les phytolithes induisant une réduction de la toxicité de l'aluminium dans les parties aériennes (Hodson & Sangster, 1993 et 2002).

- **Manganèse**

La toxicité du manganèse est réduite dans les plantes fertilisées au *Si* car ce dernier permet d'augmenter la liaison du manganèse avec les parois cellulaires, limitant ainsi sa concentration cytoplasmique (Rogalla et Römheld, 2002 et Liang et al., 2007).

- **La sécheresse**

Une augmentation des rendements a été observée chez de nombreuses variétés de cultures traitées avec du *Si* quand les cultures étaient dans des conditions de stress hydrique (Eneji et al., 2008 ; Pei et al., 2010 et Shen et al., 2010).

Les plantes de blé subissant des conditions de sécheresse ont conservé une meilleure conductance stomatique, une teneur relative en eau et un potentiel hydrique lorsqu'elles étaient traitées avec du *Si*. Les feuilles traitées étaient plus larges et épaisses, réduisant la perte en eau via la transpiration cuticulaire (Gong et al., 2003 et Hattori et al., 2005) et permettant une économie globale en eau (Eneji et al., 2008).

Dans le cas du riz, il a été montré que le traitement au *Si* améliore le développement des cellules secondaires et tertiaires de l'endoderme, ce qui permet une résistance accrue des racines dans les sols secs et une croissance plus rapide des racines (Hattori et al., 2005).

- **La salinité**

Le *Si* permet à la plante de résister aux effets de la salinité par la correction des dommages membranaires induits par cette dernière, la réduction du stress osmotique et la stimulation des fonctions trophiques (Barth, 2016).

De nombreuses études ont démontré l'effet direct du silicium sur l'amélioration des rendements dans les sols salins, dont le travail de Ali (2012) qui a démontré que la croissance ainsi que le ratio K^+/Na^+ des plantes de blé subissant un stress salin étaient améliorés avec l'application de silicate de calcium. L'absorption de Na^+ a diminuée et celle de K^+ a augmenté. Un autre exemple d'après Wang et al., 2015, des plants de concombre exposés à un stress salin et fertilisés avec du silicium ont gardé leur forte activité photosynthétique, taux de transpiration, contenu en eau et conductance hydraulique racinaire.

Ainsi, le *Si* est connu pour réduire l'absorption du Na en stimulant l'activité $H^+ ATPase$ de la membrane plasmique de la racine (Xu et al., 2015) et pour réduire la translocation du Na en favorisant sa liaison aux parois cellulaires, réduisant ainsi la concentration en sodium dans l'apoplaste des feuilles (Habibi et al., 2014).

➤ Les déséquilibres nutritifs

• Phosphore

Le *Si* est bénéfique pour la croissance du riz seulement sous de faibles (0.014 mM) ou de fortes (0.70 mM) concentrations en *P*, mais pas à un niveau intermédiaire (0.21 mM). Cet effet est attribué à la diminution de l'absorption du Fe et du Mn sous de faibles niveaux de *P* et à une réduction de l'absorption du *P* à de fortes concentrations en *P* (Ma et Takahashi, 1990). D'autre part, l'application de silicate de sodium dans les sols à faible pH et présentant un déficit en *P* diminue la sorption du *P* sur les particules de sol, le rendant plus disponible pour la plante et améliorant ainsi les rendements (Owino-Gerroh et Gascho, 2004). Cette réduction de sorption est attribuée à l'augmentation du pH du sol grâce à l'ajout du cation *Na* accompagnant.

• Potassium

L'ajout de silicate de sodium a augmenté la concentration de *K* dans les plantes de soja carencées en *K* (Miao et al., 2010).

Quant au sorgho carencée en potassium, des études ont montré que le *Si* augmente l'accumulation du potassium dans le xylème de la plante, indiquant qu'il améliore le statut de l'eau dans la plante sous déficience en *K* (Chen et al., 2016).

Pour le blé, il a été démontré par Mali et Aery, (2008) qu'il y a une augmentation de la prise de *K* par les plantes même avec de basses concentrations de *Si*. Cette amélioration dans l'absorption du *K* est en relation avec l'activation de l' $H^+ ATPase$.

- **Azote et calcium**

Mali et Aery, (2008) ont signalé une augmentation de l'absorption de *Na* et du *Ca* par le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) et le blé fertilisé avec des doses croissantes de métasilicate de sodium ainsi qu'une amélioration de la nodulation et de la fixation du N_2 chez le niébé.

2.4.2. Stress biotiques (Phytopathogène)

Le *Si* a aussi un rôle mécanique à travers lequel il donne à la plante une résistance contre les pathogènes. Le *Si* accumulé au niveau cellulaire formerait une barrière mécanique contre la pénétration des agents pathogènes, insectes ou champignons. Les dépôts au niveau de l'endoderme renforcent sa consistance, ce qui assure la protection des tissus vasculaires contre l'invasion des parasites de toute sorte (Bouzoubaâ et al., 2009). Les mêmes résultats ont été rapportés par Loïc, (2014). Le *Si* protège la plante contre la propagation des maladies, des champignons, des insectes, et des agressions biotiques et abiotiques comme la fusariose. La fertilisation de la culture de blé avec de *Si* permettrait une résistance du blé plus élevée à nombreuses maladies (mildiou, maladies racinaires et rouille brune) par rapport à celle avec du fumier. Le *Si* peut augmenter les réponses biochimiques du blé face aux infections à l'antracnose et aux attaques des insectes (Tibbitts et Spencer, 2018).

2.4.3. Photosynthèse et rendement

Les plantes cultivées dans des milieux auxquels le silicium a été fourni en quantités adéquates résistent à la verse et maintiennent un port érigé et une disposition foliaire favorables à une meilleure interception des rayons lumineux et au bon fonctionnement de la photosynthèse (Bouzoubaâ et al., 2009 et Barth, 2016). Le *Si* influence favorablement la croissance de la culture du concombre en augmentant la biomasse racinaire et réalisant une efficacité accrue de la photosynthèse. Les mêmes effets ont été observés pour le riz et le blé (Barth, 2016).

Une meilleure croissance et un meilleur rendement chez les cultures traitées avec du *Si* par rapport aux témoins ont été démontrés pour le haricot vert, le melon et le concombre, ce qui est dû à une meilleure nutrition en présence de cet élément. Les essais menés en plein sol en conditions sous serre ont montré que la nutrition minérale des plantes est meilleure en présence du *Si* qu'en son absence et que le *Si* a un effet régulateur sur cette absorption (Bouzoubaâ et al., 2009).

Les effets du *Si* sur les plantes sont présentés dans la figure 10.

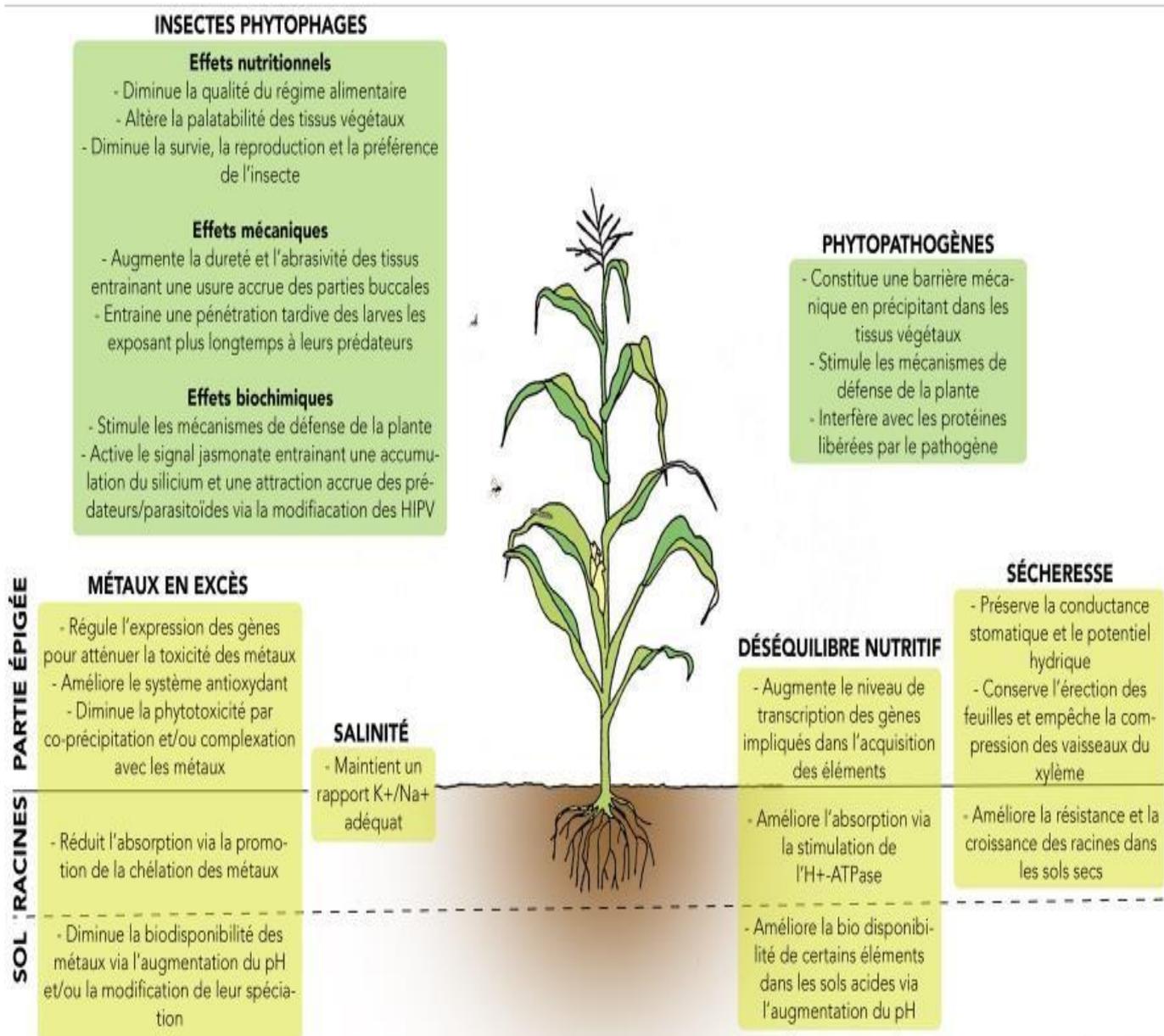


Figure 9. Représentation synthétique des différents effets du Si sur les plantes. (rectangle vert : stress biotique, rectangle jaune : stress abiotique) (Walgraffe, 2017)

MATERIELS ET METHODES

Cette étude est conduite pour évaluer la biodisponibilité du Silicium dans les sols marocains soumis à la culture de blé tendre en « Bour ». La démarche de travail mise en place pour pouvoir répondre à un ensemble de questions est la suivante :

- Quel est la teneur en Si bio disponible des sols cultivés à blé ? (Quel est l'état actuel dans les sols marocains ? Combien est-il disponible ? Y'a-t-il des possibilités de déficience ?)
- Quels sont les facteurs qui peuvent influencer la biodisponibilité du Silicium dans le sol ?
- Est-ce qu'il y a une corrélation entre le taux de Silicium et les autres propriétés pédologiques ?

La méthodologie du travail compte trois aspects de suivi :

- Préparation au terrain qui consiste tout d'abord à choisir les types de sol à l'aide d'une carte pédologique, ensuite à marquer les sites d'échantillonnage à l'aide des images satellitaires de Google Earth pour identifier les sols cultivés en céréales.
- Au champ : la collecte des échantillons de sol et de plantes dans une sélection de différents types de sol cultivés en blé tendre.
- Au laboratoire : les analyses physico-chimiques des échantillons de sol ont été effectuées au Maroc et l'analyse du taux de silicium a été effectuée en Allemagne.

Ce chapitre présente les techniques et le matériel utilisés pour la caractérisation des propriétés des sols des deux régions d'étude. Il présente une description de la zone d'étude, les données utilisées et la méthodologie employée pour atteindre les objectifs.

I. CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE

Les céréales sont pratiquées dans les différentes zones agro-climatiques du pays en assolement avec d'autres cultures annuelles, représentées essentiellement par les légumineuses, les cultures maraîchères et fourragères (MAPM, 2015).

Or, les principales régions de production se situent dans les zones pluviales des plaines et plateaux de Chaouia, Abda, Al Haouz, Tadla, Gharb et Saïs où la grande majorité des exploitations pratique la céréaliculture quel que soit leur taille (MAPM, 2015).

La disponibilité des cartes pédologiques détaillées a été un critère important pour l'identification des zones d'étude spécifiques : la partie nord de la province de Settat et la province de Meknès dans sa totalité.

Ces deux zones céréalières se caractérisent par une diversification des types de sols et par la présence d'unités pédologiques représentatives des principaux types de sol cultivés en céréales du pays : les sols minéraux bruts, les vertisols, les sols calcimagnésiques, les sols isohumiques, les sols brunifiés, les sols à sesquioxydes de fer. Ceci nous permettra d'extrapoler les résultats obtenus sur les autres régions du Maroc ayant les mêmes types de sol.

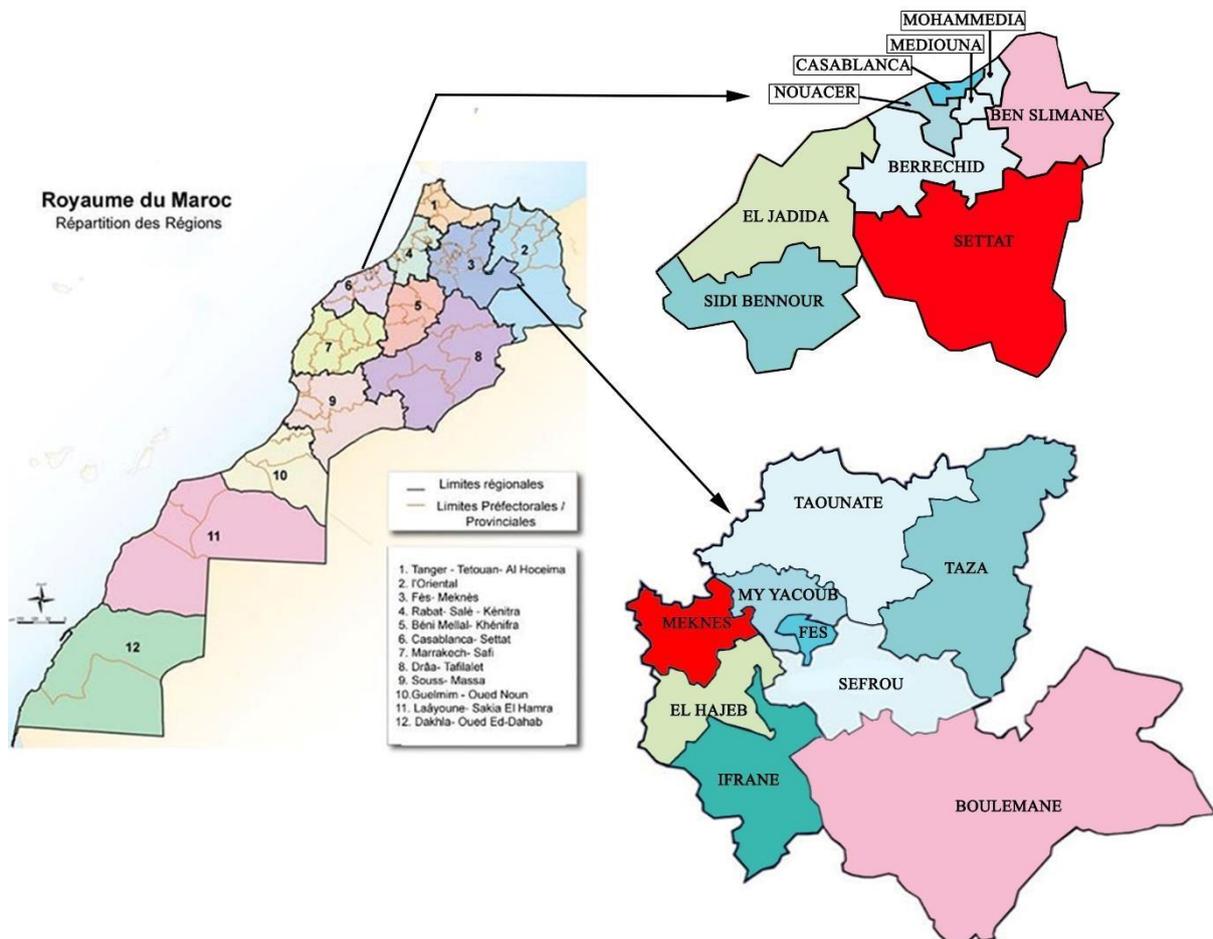


Figure 10. Identification des provinces de Settat et Meknès à l'échelle nationale

II. PRESENTATION DES REGIONS CEREALES CHOISIES

1. REGION DE CASABLANCA-SETTAT

La région de Casablanca-Settat est très diversifiée en termes de cultures pratiquées. La SAU dans la région est cultivée principalement en céréales comme le montre la figure 11 (monographie agricole de la région Casablanca-Settat, 2018).

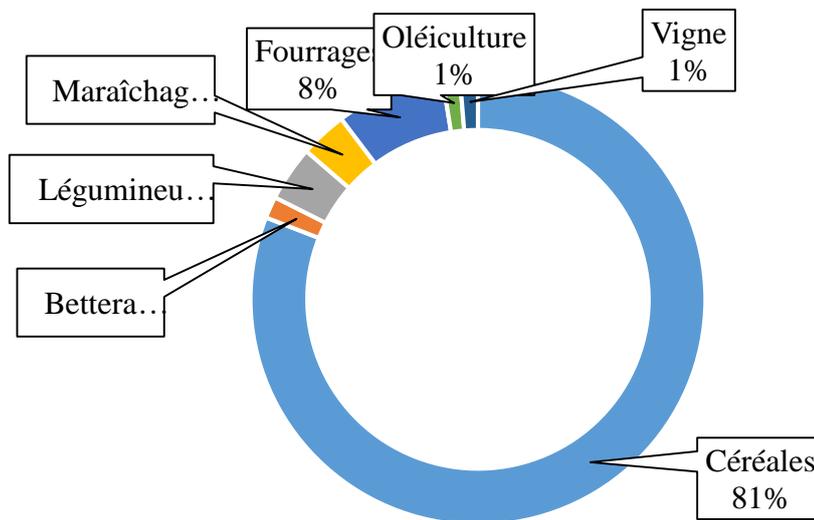


Figure 11 : Part relative des superficies des cultures pratiquées dans la région de Casablanca-Settat (Monographie agricole de la région Casablanca-Settat, 2018)

Durant la campagne agricole 2016/2017, la région de Casablanca-Settat a atteint une production de plus de 26 millions de *Qx*. D'où, elle assure 25 % de la production nationale en céréales (Herradi, 2017). Notre étude s'est déroulée dans la zone nord de la province de Settat qui est délimitée par Khouribga à l'est et Benslimane et Berrechid au nord, couvrant une superficie de 124 km².

1.1. Sols de la région

Les sols sont diversifiés, ils sont de type argileux dans la majeure partie de l'espace rural et sableux dans la zone littorale. Il s'agit des sols de haute capacité de rétention d'eau (Monographie de Casablanca-Settat, 2015).

La figure 12 nous montre l'ensemble des types de sols caractérisant la région de Casablanca-Settat dont le type de sol le plus dominant est le sol calcimagnésique au niveau du sud-ouest et du sud-est où se situe notre zone d'étude.

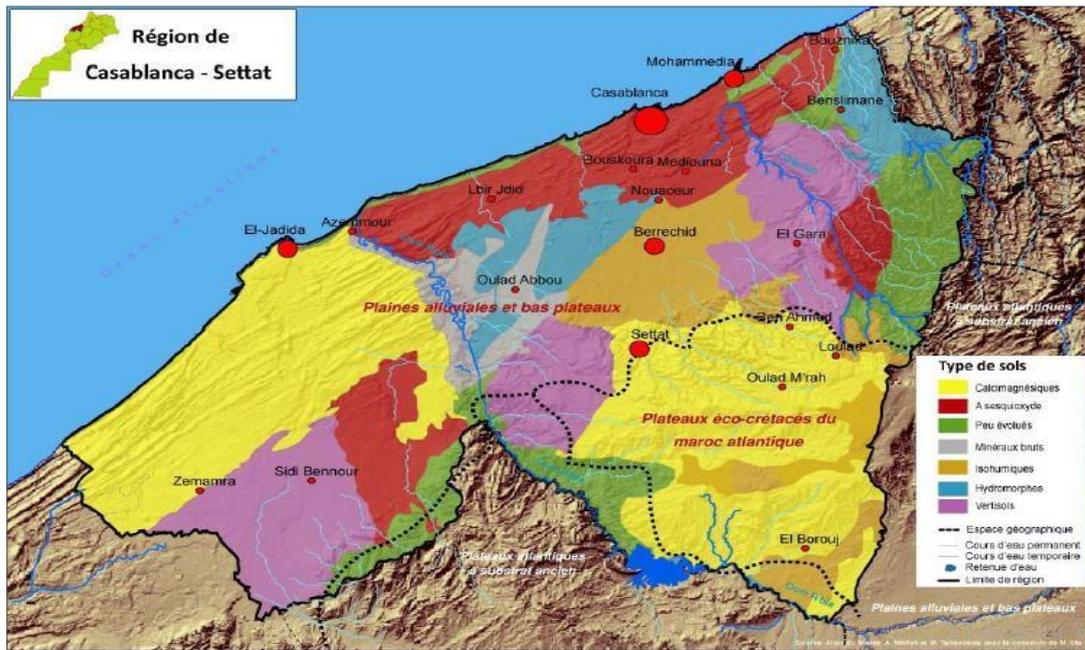


Figure 12. Types de sol de la région de Casablanca-Settat (monographie de Casablanca-Settat, 2015)

1.2. Climat de la province de Settat

Un climat tempéré chaud est présent à Settat. L'été, à Settat, les pluies sont moins importantes qu'elles ne le sont en hiver. La carte climatique de Köppen-Geiger y classe le climat comme étant de type Csa (climat méditerranéen, chaud été). En moyenne, la température à Settat est de 17.3 °C. Il tombe en moyenne 372 mm de pluie par an (Climate data, 2018).

2. REGION DE FES MEKNES

La région de Fès-Meknès est très diversifiée en termes de cultures pratiquées. La SAU dans la région est cultivée principalement en céréales comme le montre la figure 15 (Balaghi, 2017).

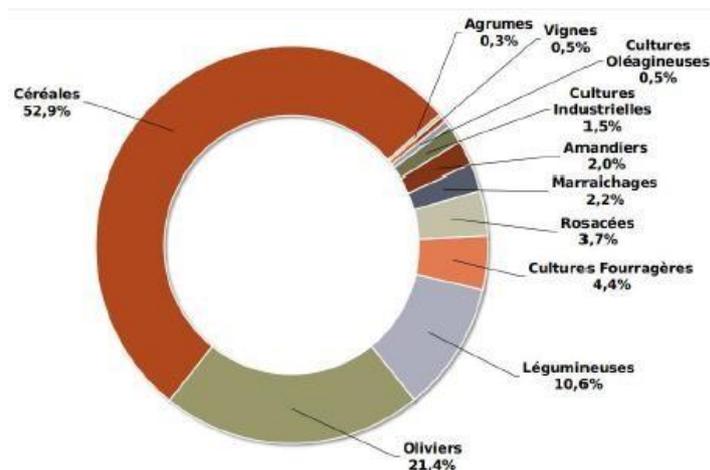


Figure 13. Part relative des superficies des cultures pratiquées dans la région de Fès-Meknès (MAPMDREF, 2016).

Les rendements des céréales (blé tendre, blé dur et orge) sont de 16 *Qx/ha* contre 12 *Qx/ha* à l'échelle nationale, en moyenne sur la période 2000-2001 à 2016- 2017 (Figure 15).

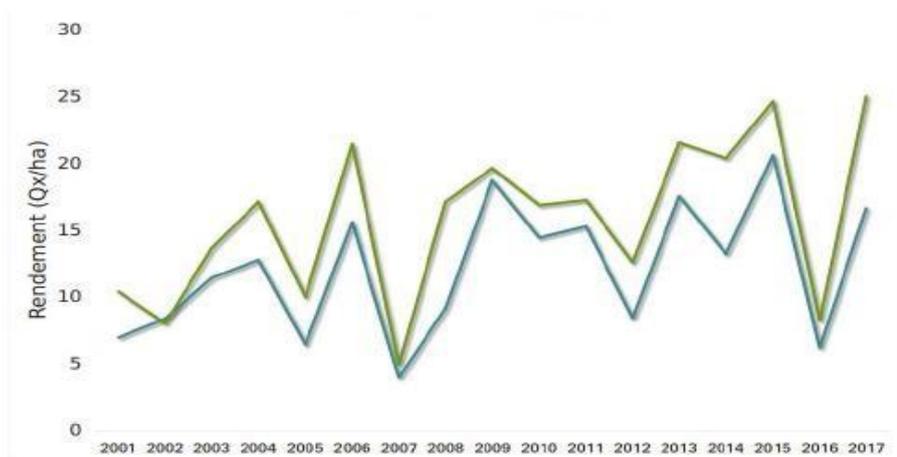


Figure 14. Evolution des rendements des céréales (blé tendre, blé dur et orge) à l'échelle nationale et dans la région de Fès-Meknès (MAPMDREF, 2016)

En effet, les rendements céréaliers les plus élevés sont réalisés, par ordre décroissant, dans les provinces de Meknès, El Hajeb, Fès et Taounate, alors que dans les zones montagneuses, les rendements sont très faibles (Balaghi, 2017).

2.1. Sols de la région

Trois grands types de sol dans la région sont identifiés dans la figure 15 : les sols minéraux bruts dans la province de Boulemane ; les sols bruns, dans la plaine de Saïss, caractérisés par leur formation épaisse, fertile et riche en éléments nutritifs et les sols tirs (sol lourd argileux) et les vertisols de Saïss et Sefrou, possédant la meilleure valeur agricole (Monographie de la région Fès-Meknès, 2015). Cependant, comme il est montré dans la carte notre zone d'étude se caractérise par des sols isohumiques.

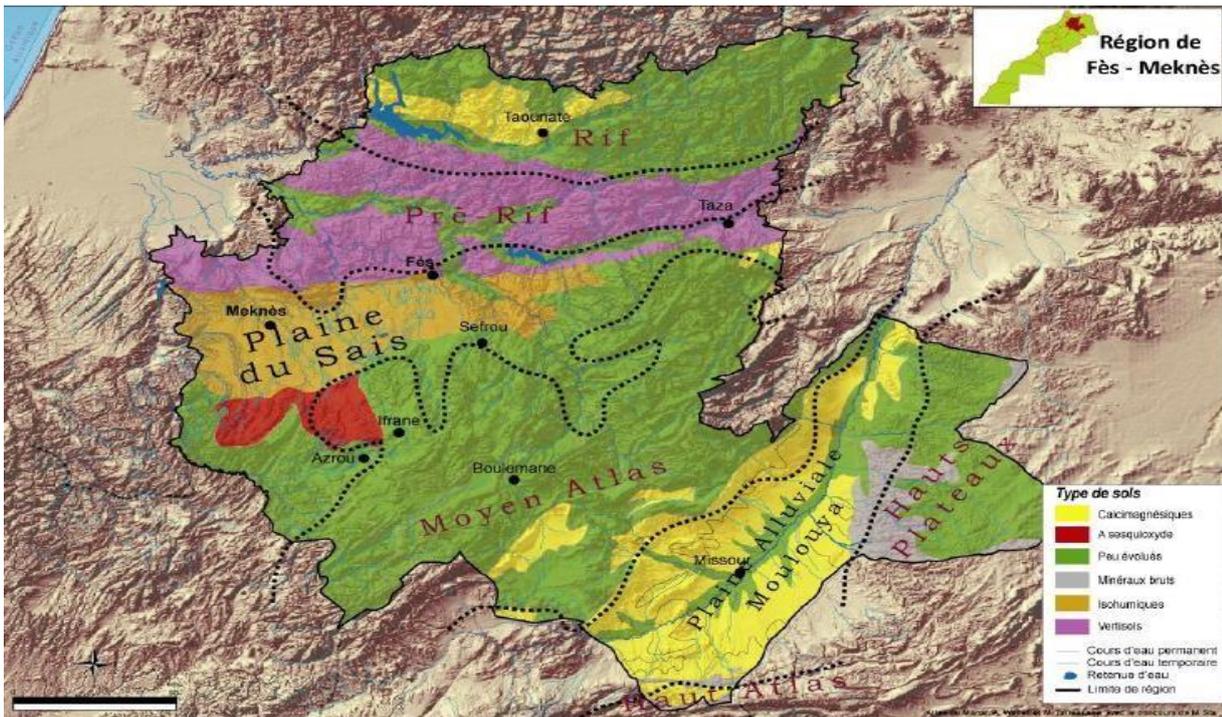


Figure 15. Carte des types de sols de la région Fès-Meknès (monographie de la région Fès-Meknès, 2015)

2.2. Climat de la préfecture de Meknès

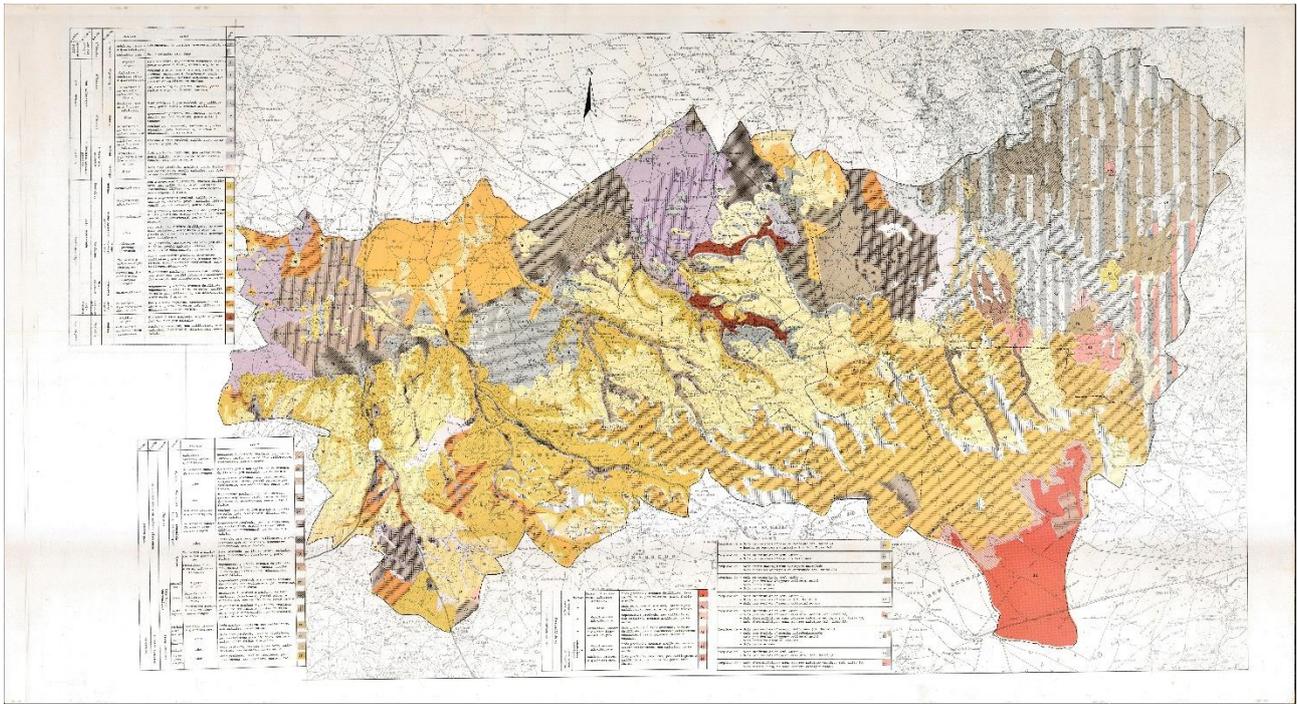
La ville de Meknès bénéficie d'un climat tempéré chaud. La pluie dans la région de Meknès tombe surtout en hiver, avec relativement peu de pluie en été. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est de type Csa. La région de Meknès affiche une température annuelle moyenne de 17.2 °C. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 576 mm (Climate data, 2018)

III. CARTES PEDOLOGIQUES UTILISEES

1. ZONE D'ETUDE

Comme données de bases, nous avons utilisé pour la région de Settat une carte pédologique scannée de la zone nord de la province sous format (.jpg). Alors que pour la région de Meknès, nous nous sommes limités sur une carte des sols sous format numérique.

Sur l'annexe 1, on trouvera l'ensemble des informations des différentes classes de sol des deux zones d'étude.



III. TRAITEMENT DES DONNEES

Pour Settat, nous avons effectué le géo-référencement de la carte en utilisant le logiciel ArcGIS. Cette opération est effectuée en s'appuyant sur des points de calage dont la position réelle est connue. Le résultat de cette opération est une carte raster superposable avec le fichier vecteur des limites de la province de Settat.

L'étape qui suit est la digitalisation des unités cartographiques au niveau des sous classes de sol. Et enfin, nous avons alimenté la table attributaire du fichier vecteur par les informations dans le tableur Excel. Ceci est effectué par une jointure de tables faite à l'aide du même logiciel. Le principe étant de relier deux tables attributaire, celle du fichier vecteur avec celle du tableur Excel, à l'aide d'un attribut commun. Le résultat de cette étape étant un fichier vecteur ayant pour chaque portion de la zone, les informations nécessaires concernant la classe de sol.

Ensuite, on a produit une carte thématique des classes de sol en attribuant à chaque classe de sol une nuance de couleur afin de différencier entre les différents types (Figure 21).

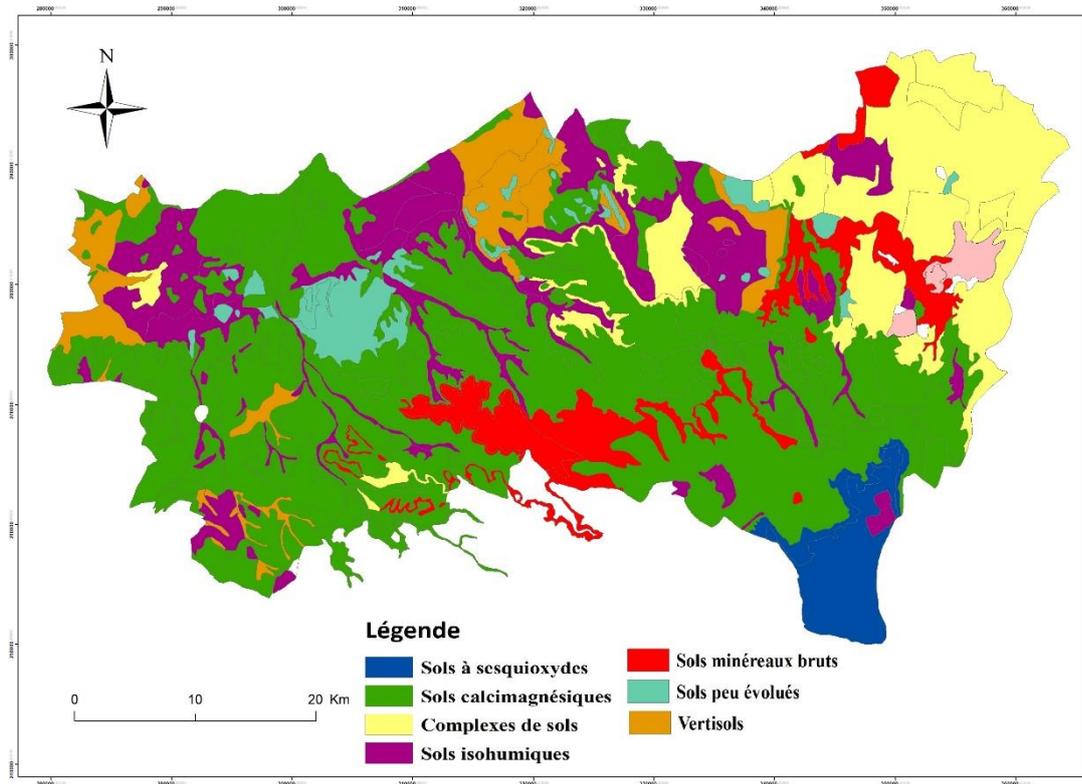


FIGURE 16. CARTE THÉMATIQUE DES CLASSES DE SOL DE LA ZONE NORD DE SETTAT.

Pour Meknès, nous avons produit une carte thématique des classes de sols comme la figure 20 le montre :

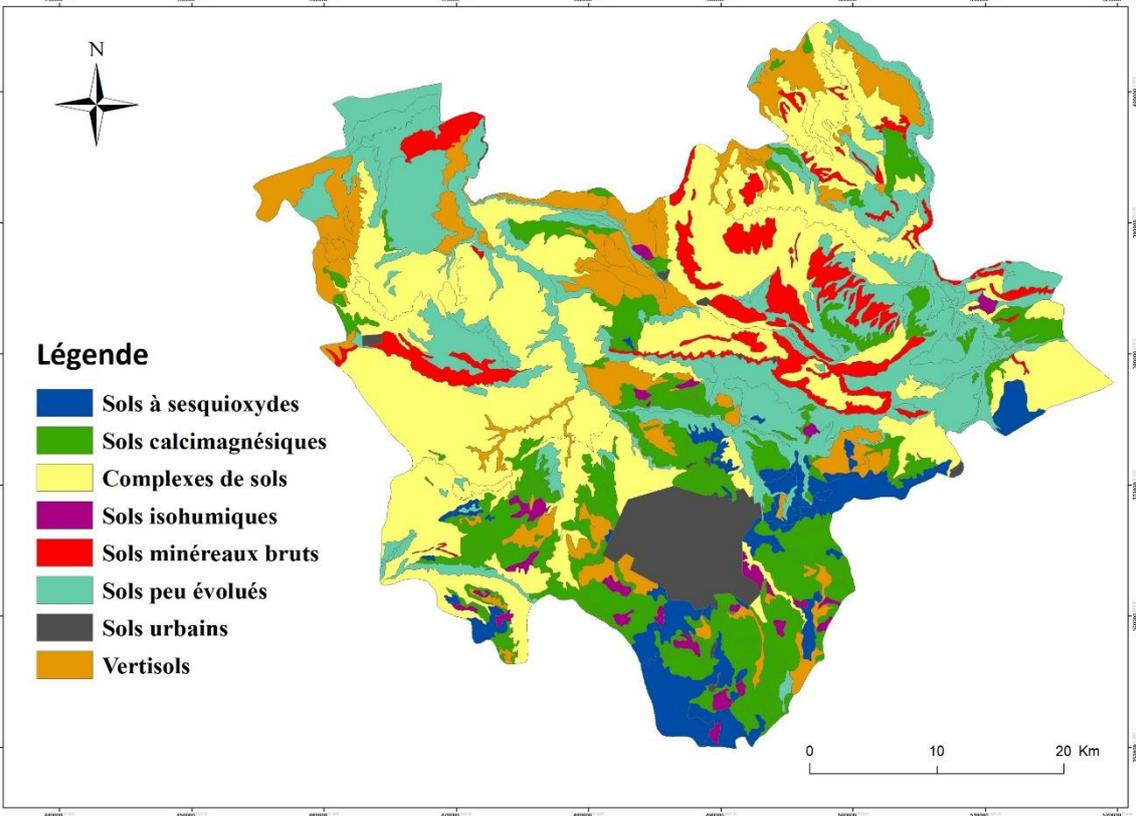


Figure 17. Carte thématique des classes de sol de Meknès

IV. IDENTIFICATION DES SOLS POUR L'ÉCHANTILLONNAGE

1. CHOIX DES SOLS SELON LES CLASSES

1.1. Zone d'étude de Settat

Les différentes classes de sol en termes de superficie occupée par chaque classe de sol sont montrées dans la figure 23

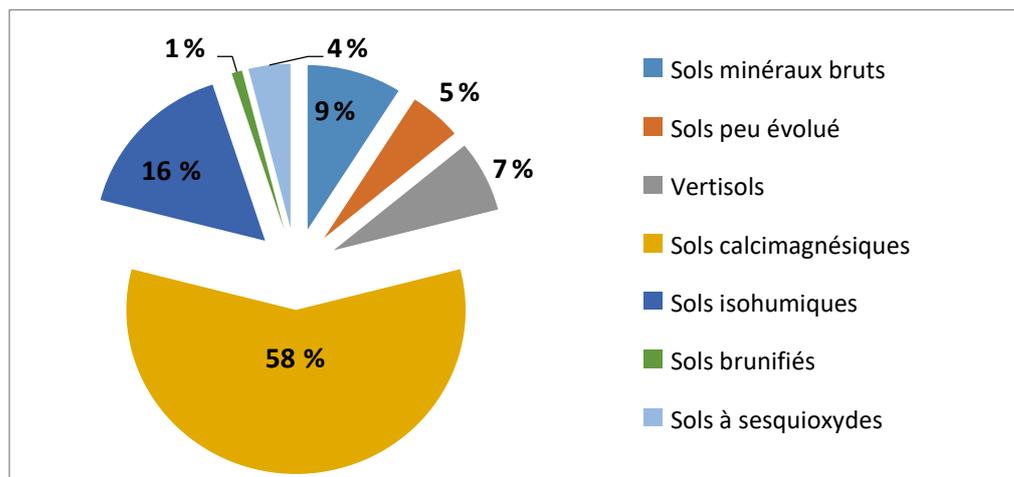


Figure 18. Pourcentage de superficie occupée par chaque classe de sol dans la zone d'étude de Settat

La classe des sols brunifiés représente un faible pourcentage vis-à-vis des autres classes de sol de la région et est donc non représentative pour notre étude. Cependant, la classe de sol peu évolué et la classe de sol des minéraux bruts ont été considérées non représentatives aussi. Le premier type de sol, qui est la classe des sols brunifiés, est rajeuni par l'érosion ou résultant d'apports par cours d'eau. Alors que le deuxième, qui est la classe de sol peu évolué, est caractérisé par des lithosols qui ne permettent pas la pénétration des racines de la plante dans le sol. Aussi bien que l'altération de la roche-mère est poussée mais il est souvent difficile, sur la simple observation du profil, de déterminer un sens d'évolution par suite d'une grande jeunesse du sol ou bien en raison de climat ne permettant pas des processus d'évolution bien tranchés. Quant au troisième, qui est la classe de sol des minéraux bruts, la matière organique est pratiquement absente mais non l'activité biologique. Il n'y a pas d'évolution de la matière minérale qui reste à l'état brut souvent fragmentée mécaniquement. Les sols de cette classe sont ceux des déserts mais peuvent s'observer dans tous les autres milieux où, pour une cause ou une autre, (inondation, éruption volcanique, érosion intense et brutale) une roche massive ou divisée a été placée dans des conditions nouvelles. Avec le temps, elle sera susceptible d'évoluer dès qu'une activité biologique aura pu démarrer.

Donc, on a choisi les classes de sol qui suivent :

- **Classe des sols calcimagnésiques** : Ces sols sont sous la dépendance de carbonates et sulfates de calcium et magnésium (*Mg*). Il s'agit de sols à profil AC ou A (8) C généralement peu épais. Les sols de la première sous-classe, rendzines, sols bruns calcaires, sont très fréquents en zone tempérée. Dans les pays de climat méditerranéen, ils sont également bien connus (Afrique du Nord, Mexique). Ils apparaissent plus rarement dans la zone intertropicale. La sous-classe des sols à accumulation gypseuse est représentée dans les sols de la région méditerranéenne.
- **Les vertisols** (ce nom a été emprunté à la 7^e Approximation de la classification américaine) sont des sols de couleur foncée, sans que la teneur en matière organique soit très élevée, riches en argile (*Ag*) gonflante. Ils présentent en saison sèche de grosses fentes de retrait jusqu'à une profondeur de 50 à 80 cm. En profondeur, on observe des faces de glissements brillants et très fréquemment des nodules calcaires. Deux sous-classes ont été distinguées suivant que les vertisols se sont développées dans de grandes plaines où les matériaux alluviaux sont déjà riches en *Ag* gonflante, en calcium (*Ca*), ce sont les vertisols topomorphes ; tandis que certaines roches par suite de l'abondance de silice, *Mg*, *Ca* (basaltes, amphibolites, diorites, etc.), suffisent à fournir les matériaux nécessaires à la synthèse de ces *Ag* gonflantes. Des groupes ont été distingués d'après la structure de l'horizon supérieur qualifié ou non de grumosolique (structure grenue).
- **Les sols isohumiques** sont caractérisés par une teneur progressivement décroissante dans des profils de la matière organique. Le sol est riche en cations bivalents ; l'*Ag* est de type 2.1 ; la matière organique est riche en acides humiques. Quatre sous-classes ont été reconnues. Dans la première, les sols ont un complexe partiellement désaturé. Ce sont les brunizems qu'on connaît dans le centre des U.S.A. et en République Argentine. Une autre sous-classe correspond aux sols isohumiques des régions tempérées froides avec les chernozems, sols châtaîns et sols bruns isohumiques. Une troisième sous-classe correspond à des sols saturés de climats subtropicaux et fréquents en zone méditerranéenne : les sols châtaîns, les sols bruns subtropicaux et les sierozems. La dernière sous-classe rassemble les sols isohumiques des régions tropicales subarides ; si la matière organique a les caractéristiques énoncées précédemment, les teneurs deviennent extrêmement faibles
- **Les sols à sesquioxydes** très individualisés sont caractérisés par une altération très poussée aboutissant à la concentration des hydroxydes de fer et souvent d'alumine (sols ferralitiques et sols ferrugineux tropicaux).

1.2. Zone d'étude de Meknès

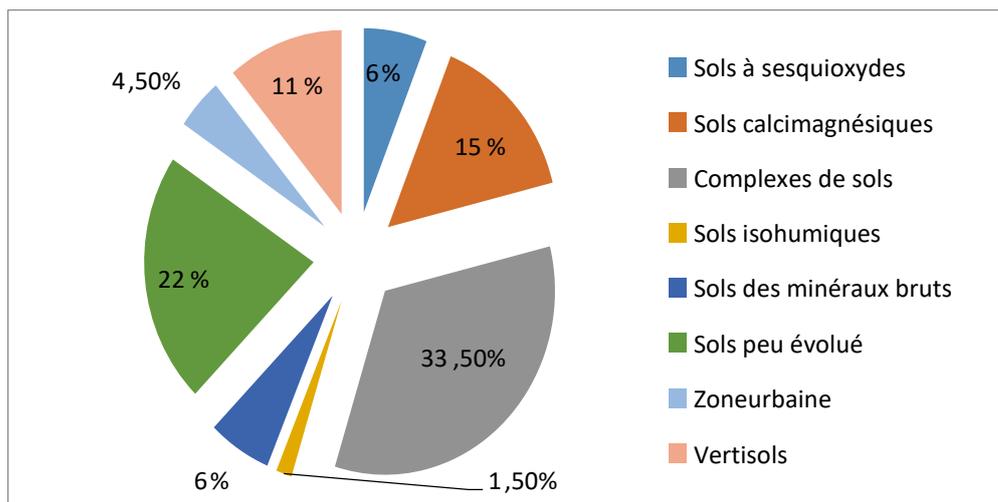


Figure 19. Pourcentages des superficies occupées par les classes de sol dans la zone d'étude de Meknès.

Malgré leurs dominances au niveau de la région de Meknès, les complexes de sols et les sols peu évolués ont été considérés non représentatifs. Les premiers sont un mélange de sols et les deuxièmes sont rajeunies par l'érosion ou résultants d'apports par cours d'eau.

Donc, les classes choisies pour échantillonnage sont : sols calcimagnésiques, vertisols, sols à sesquioxydes et sols isohumiques.

2. CHOIX DES SOLS SELON LES SOUS-CLASSES, GROUPE OU SOUS-GROUPE

Après avoir choisi les classes de sol, le choix des sous-classes pour échantillonnage est réalisé selon (Annexe 2)

- La superficie occupée par chaque sous-classe avec la priorité à ceux ayant la plus grande superficie.
- Les caractéristiques de chaque sous-classe avec la particularité à leur lithologie et la minéralogie du matériel parental.

V. TRAVAIL DU TERRAIN

Comme il n'est pas possible d'analyser le sol dans sa globalité, on a recours à une stratégie d'échantillonnage. A partir des données disponibles, on peut identifier au préalable les sites d'échantillonnage. Donc, on a choisi un échantillonnage aléatoire qui consiste à sélectionner aléatoirement l'emplacement des points de prélèvement sur la zone d'étude.

Cette méthode n'introduit pas de biais de sélection dans le choix des échantillons puisque chaque point a la même probabilité d'être tiré au sort.

1. CHOIX DES POINTS DE PRELEVEMENT VIA GOOGLE EARTH

Après avoir choisi les différentes classes de sol, on a exporté la carte thématique des sols sous format KML pour la superposer sur Google Earth. Ceci nous a permis de distinguer, dans chaque classe de sol, les zones cultivées à céréales, donc des points d'échantillonnage potentiels, comme montré en figures 25 et 26

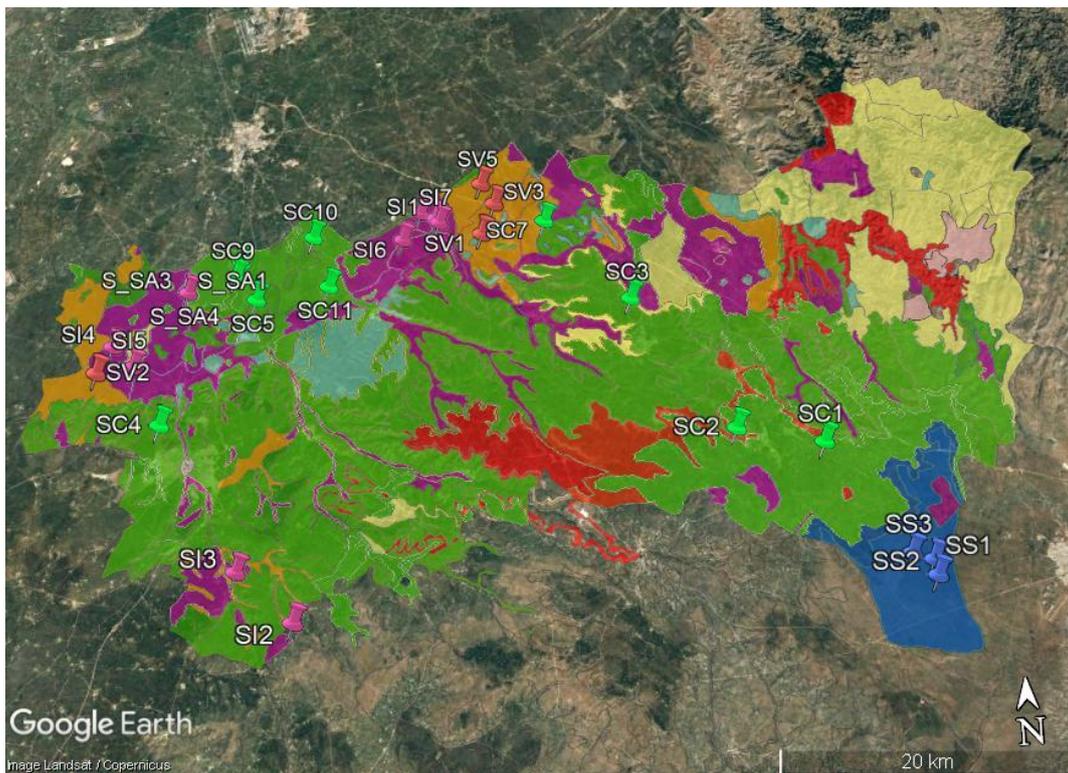


Figure 20. Choix des points d'échantillonnage sur l'image satellitaire (Settat)

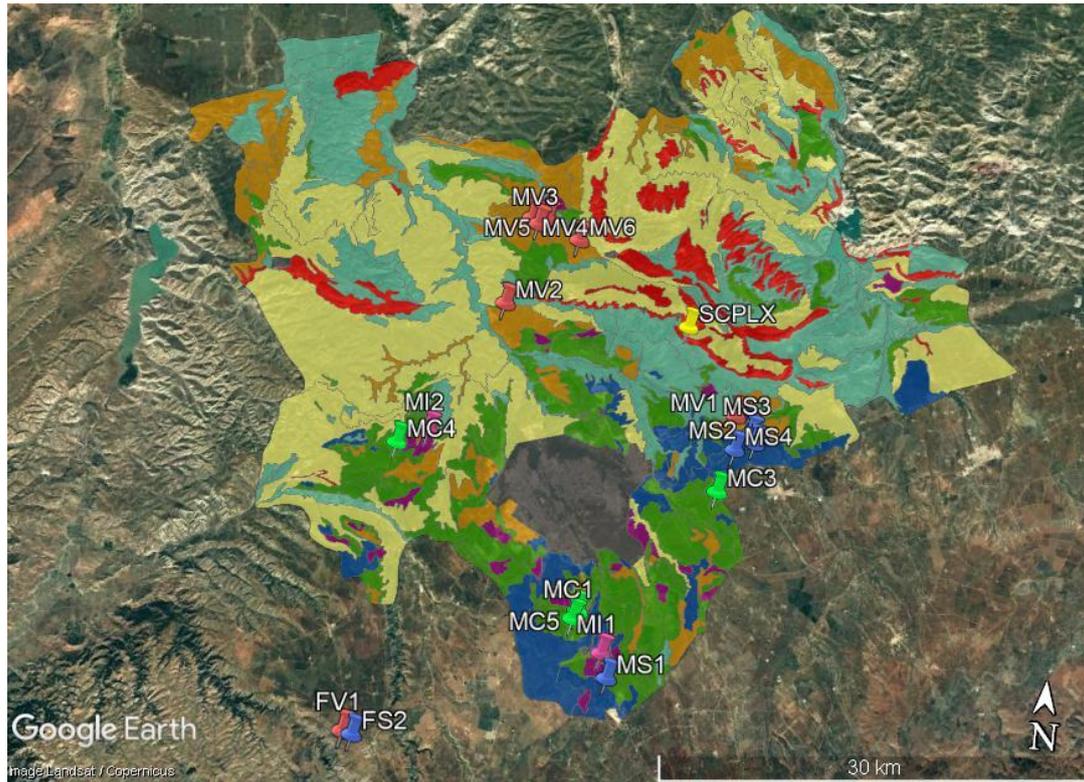


Figure 21. Choix des points d'échantillonnage sur l'image satellitaire (Meknès)

Les coordonnées des points de prélèvements sont générées à l'aide de Google Earth, ensuite elles sont chargées dans les téléphones, qui, avec leur système de GPS nous ont permis d'identifier les itinéraires routiers appropriés pour rejoindre les points potentiels à échantillonner.

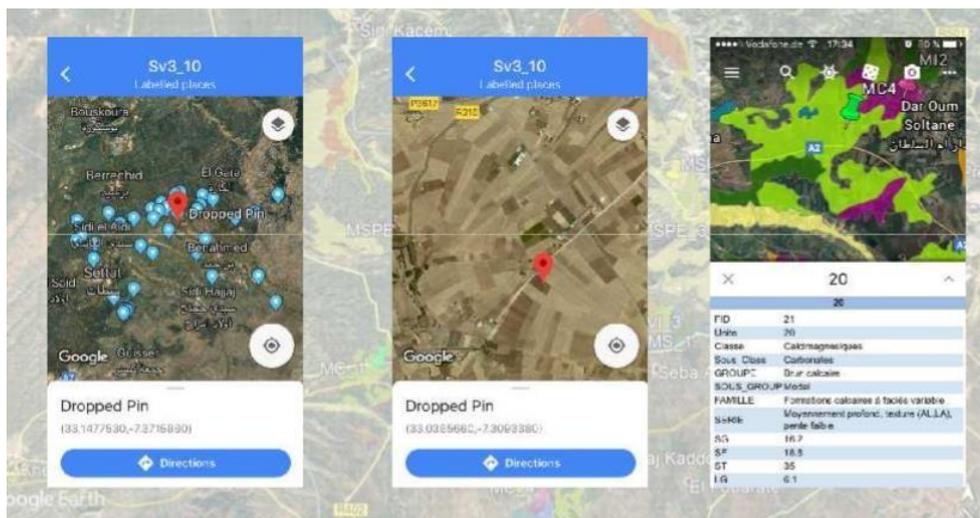


Figure 22. Carte des emplacements d'échantillons sélectionnés dans Google Earth (propre illustration)

A gauche, on trouve l'ensemble des points potentiels d'échantillonnage qu'on a introduit sur nos téléphones avec le positionnement sur le point (Sv3_10). Ensuite, au centre on aperçoit l'endroit exact du point Sv3_10 ainsi que la route qui va nous amener à l'achever. Enfin et à l'aide de Google Earth, on essaie de se positionner au niveau du polygone qui représente une classe de sol.

2. PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE SOL

Le prélèvement des échantillons a été réalisé au cours de 5 sorties : 3 dans la région de Settat et 2 dans la région de Meknès depuis mi-avril jusqu'à mi-mai.

Dans chaque champ de blé tendre pré-identifié, trois points ont été emplacements aléatoirement, l'un est loin de l'autre d'une distance qui va de 10 à 20m, pour en prélever des échantillons de sol et de plantes destinés à être analysés au laboratoire.

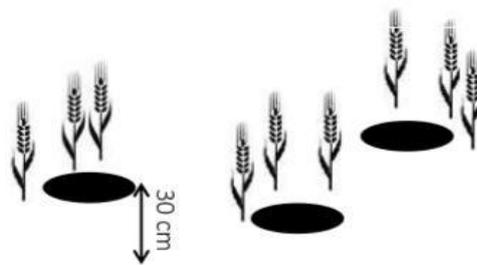


Figure 23. Schématisation du prélèvement du sol et des plantes

La profondeur d'échantillonnage du sol sur chaque point était généralement de 0 cm à 30 cm. Parfois, elle a été moins à cause des affleurements rocheux. Cependant, le prélèvement a été effectué à l'aide d'un ensemble de matériels : Tarière, sot, sachets pour stockage des échantillons, stylos ou marqueurs et fiche technique de prélèvements.

Quant à la plante, on coupait trois tiges de blé tendre pour chaque point d'échantillonnage.



Figure 24. Matériels du prélèvement

Le sol des trois prélèvements est transvasé dans le seau pour constituer un échantillon composite et transféré dans un sachet plastique de 1 à 2 kg de sol. Le sachet est fermé et étiqueté (date, région, référence du sol).

Au niveau de la région de Settât, nous avons pu visiter la station expérimentale de l'INRA, situé à Sidi El Aydi. Sur le même type de sol isohumique, nous avons prélevé deux échantillons composites de sol sur une zone irriguée et sur une zone non irriguée pour la même variété de blé tendre.

Quant à la région de Meknès, nous avons eu l'occasion de visiter une ferme d'agriculture de conservation. D'où on a prélevé deux autres échantillons composites de sol sur deux différents types de sol : vertisols et sols à sesquioxydes de fer.

Quant à la plante, on coupait 3 tiges de blé tendre pour chaque site d'échantillonnage, ensuite on les a séchés dans une étuve pour qu'on puisse les emballer et les expédier en Allemagne afin de subir des analyses du silicium.

3. PRETRAITEMENT DES ECHANTILLONS DE SOL : PREPARATION DE L'ECHANTILLON

Le présent mode opératoire a été suivi en vue de l'obtention de la terre fine.

- **Séchage** de l'échantillon à l'air ambiant pendant 4 à 5 jours (figure 30)



Figure 25. Séchage des échantillons

- **Broyage et pilonnage** : on broie l'échantillon avec passage forcé à travers une maille de 2 mm. Après homogénéisation, on garde l'échantillon de terre fine dans une boîte.



Figure 26. Broyage et pilonnage de l'échantillon

VI. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS

Afin de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des sols, nous avons réalisé les analyses suivantes : la granulométrie, la mesure du pH, la mesure de la conductivité électrique, le calcaire total, la capacité d'échange cationique, les bases échangeables et la matière organique.

1. ANALYSE PHYSIQUE : GRANULOMETRIE

C'est la méthode de la pipette de Robinson que nous avons utilisée pour déterminer la composition centésimale de nos échantillons en Ag, limons et sables. Elle est basée sur la vitesse de sédimentation des particules. Avant de commencer l'expérimentation, les échantillons doivent tout d'abord subir des prétraitements permettant de détruire la matière organique et le calcaire.

Pour procéder, nous avons tout d'abord pesé entre seize (16) et dix-huit (18) grammes de l'échantillon dans une capsule sur lequel on a mis 20 ml d'hexametaphosphate de sodium à 50 % (calgon). Ensuite on y a ajouté de l'eau distillée jusqu'à un niveau minimal avant de l'agiter moyennant le mixer à couteau durant au moins cinq minutes (5mn).

Après agitation, la suspension homogénéisée a été transférée dans une éprouvette graduée à travers deux tamis superposés (l'un de 0.2 mm et l'autre de 0.05 mm). On a rincé les deux tamis tout en récupérant l'eau dans l'éprouvette dont le niveau a été ajusté à 1000 ml avec de l'eau distillée après le rinçage.

2. ANALYSE CHIMIQUE

2.1. pH du sol (1/2.5)

On a pesé 20 g de sol sur lequel on a ajouté 50 ml d'eau distillée. Après 30 mn au repos, on a agité la suspension et mesuré le pH moyennant un pH mètre.

Les normes d'interprétation sont présentées dans le tableau 5 :

Tableau 5. Interprétation du pH des sols (Soil survey report- ICARDA farm Marchouch, 2014).

pH	4.5 - 5	5 – 5.5	5.5-6	6-6.5	6.5- 7.3	7.3-7.8	7.8-8.5	8.5-9	>9
Interprétation	Très fortement acide	fortement acide	Modérément acide	légèrement acide	Neutre	Légèrement basique	Modérément basique	alcalin	Très alcalin

2.2. Conductivité électrique (1/5)

On a pesé 10 g de sol sur lequel on a ajouté 50 ml d'eau distillée. Après 15 min au repos, on a agité la suspension et mesuré la *CE* à l'aide du conductimètre. Les normes d'interprétation sont présentées dans le tableau 6

Tableau 6. Interprétation de la *CE* (1/5) des sols (Soil survey report – ICARDA Farm Marchouch, 2014)

Interprétation	Conductivité électrique (<i>ds/m</i>)
Non salin	<0.1
Peu salin	0.1 – 0.3
Salin	0.31 – 0.65
Fortement salin	0.66 – 1.4
Très fortement salin	>3

2.3. Calcaire totale par perte de poids

La détermination du carbonate de chaux total permet une classification des sols en différentes catégories : sols non calcaire, calcaires, franchement calcaires.

Pour ce faire, nous avons pesé avec précision entre 0,5 et 1g du sol. Ensuite, nous avons introduit 10 ml d'*HCl* dans un bécher puis on a pesé cet ensemble. Par la suite, le sol au poids connu fut

introduit dans l'ensemble bécher plus acide. Après 30 mn, on a pesé le nouvel ensemble (bécher + acide +sol). On fait la différence des deux pesées (x)

Donc : $\%CaCO_3 = (x*100*2.5) / \text{poids du sol}$

Les normes d'interprétation sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 7. Classification des sols selon le pourcentage de calcaire ($CaCO_3$) (Soil survey report – ICARDA Farm Marchouch, 2014)

Calcaire total (%)	<1	1 - 5	5 - 25	25 – 50	50 – 80	>80
Interprétation	Non calcaire	Peu calcaire	Moyennement calcaire	Fortement calcaire	Très fortement calcaire	Excessivement calcaire

2.4. Matière organique

Pour la détermination de la matière organique, c'est la méthode de Walkley-Black que nous avons utilisé.

Pour ce faire, nous avons pesé avec précision entre 0.5 et 1 g de sol dans un erlenmeyer de 500 ml. Après, on y a ajouté 10 ml de $K_2Cr_2O_7$ (1N) et rapidement 20 ml de H_2SO_4 technique. Après agitation, nous l'avons laissé au repos pendant 30 mn. Après le repos, on y a ajouté 200 ml d' H_2O pour arrêter la réaction et 10 ml de $BaCl_2$ et 5 ml de H_3PO_4 . Afin, nous l'avons titré par $FeSO_4$ (0.5N) après y avoir ajouté 1 ml d'indicateur coloré (diphénylamine).

L'équilibre s'atteint au vert franc. Nous avons réalisé deux témoins (même traitements sans sol).

Donc : $(\text{Volume témoin} - \text{Volume titré}) * 0.15 / \text{poids du sol}$

Tableau 8. Normes d'interprétation de la matière organique (Soil survey report – ICARDA farm Marchouch, 2014)

Matière organique (%)	Niveau
0.7	Sol très pauvre
0.7 – 1.5	Sol pauvre
1.5 – 3.0	Sol moyennement pauvre
3.0 – 6	Sol bien pourvu
6	Sol très bien pourvu

2.5. Bases échangeables

Les bases échangeables représentent les cations (en méq /1000g) qui se trouvent adsorbés sur le complexe d'échange. La somme des bases échangeables (S) correspond à : $\sum \text{méq}/100\text{g}$ (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})

C'est la méthode d'acétate d'ammonium que nous avons utilisée pour déterminer nos bases échangeables. Elle consiste à peser 5 g de sol dans des tubes à centrifuger sur lequel on ajoute 25 ml d'acétate d'ammonium puis on agite pendant 30 mn, centrifuge pendant 10 min et par la fin, on filtre. On répète les étapes d'agitation, centrifugation et filtration trois fois. Le filtrat obtenu est ajusté à 100 ml avec l'acétate d'ammonium. K^+ et Na^+ sont déterminés par le photomètre à flamme. Ca^{2+} et Mg^{2+} sont déterminés par titrimétrie. Tous les résultats sont exprimés en méq/100g de sol.

2.6. Capacité d'échange cationique

La Capacité d'Echange Cationique (*CEC*) représente la totalité des cations échangeables (T) : $T = \sum \text{méq}/100\text{g}$ (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Al^{3+}). C'est la méthode d'acétate de sodium qui nous a servi à déterminer la *CEC*.

Pour ce faire, une suspension de 5 g et 30 ml d'acétate de sodium fut agitée pendant 30 mn, centrifugée pendant 10 min et décantée. Cette extraction fut réalisée trois et le volume final fut ajusté à 100 ml avec l'acétate de sodium.

Après cette extraction, on procède au lavage du culot du sol avec l'alcool. Pour ce faire, on met 30 ml d'alcool sur le culot et l'agite pendant 30 mn, le centrifuge pendant 10 mn et le décante. Cette étape est répétée trois fois. Une fois lavé à l'alcool, le culot subit encore une extraction avec l'acétate d'ammonium. Cette extraction se fait de la même manière que pour les bases échangeables.

Les normes d'interprétation sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 9. Normes pour la *CEC* en méq/100g du sol (Soil survey report – ICARDA Farm Marchouch, 2014)

Qualification du sol	Très faible	Faible	Moyen	Forte	Très fort
CEC (meq/100g)	5	5 à 10	10 à 25	25 à 40	40

- Extraction de silice occluse dans des oxydes et hydroxydes pédogènes avec de l'oxalate d'ammonium et de l'acide oxalique sous lumière ultraviolette (Tamm 1932, modifiée)
- Séparation de la forme hydratée du silicium (bio-opal) avec du SPT (polytungstate sodium) (Madella et al. 1998, modifiée) et extraction de silice biogénique amorphe avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) ;
- Extraction de silice amorphe totale avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) ; la quantité de silice minérogène amorphe est interprétée comme la différence entre la quantité totale de silice amorphe (étape 6) et la quantité de silice biogénique amorphe (étape 5)
- En dehors de l'extraction séquentielle) - Détermination de la concentration totale en Si par fusion avec le borate de lithium suivie d'une dissolution dans l'acide nitrique (DIN ISO 14869-2, 2003)

Les flacons sont pesés vides. Deux aliquotes de 1 gramme de sol séché à l'air et tamisé (<2 mm) sont pesées dans des flacons de 50 ml. Les échantillons (ainsi que les flacons) sont à nouveau pesés avant de commencer la prochaine étape d'extraction. Les filtres en papier (porosité : 1-2 µm) sont utilisés pour filtrer les extraits. D'autres filtres circulaires (porosité : 0,2 µm) sont utilisés dans le cas où l'extrait est très trouble. Le filtrat est rassemblé dans des flacons de 20 ml. Des parties de l'échantillon de terre restant sur le filtre sont réintroduites dans les flacons de 50 ml à l'aide d'un flacon de lavage (eau distillée).

Les échantillons sont rincés deux fois après chaque étape d'extraction : pour cela, les flacons sont remplis jusqu'à 45 ml avec de l'eau distillée, bien fermés et agités pour retirer le sol du fond du tube. Ensuite, les échantillons sont centrifugés (5 min, 3000 tr / min) et le surnageant est soigneusement évacué et jeté. L'étape entière est répétée une fois (ou plutôt jusqu'à ce que le surnageant soit clair). L'eau distillée restante sur l'échantillon est évaporée dans l'étuve (40 à 50 ° C pendant environ 1 heure). Les échantillons de sol ne doivent en aucun cas être complètement secs et durs (sortez-les quand ils sont encore humides). L'étape 5 est une exception : les échantillons avec Bio-opal sont complètement séchés (80 ° C).

Avant extraction, ils sont réduits en cendres dans un four (450 ° C pendant 12 heures), mélangés avec du HCl 2 M et laissés au repos pendant deux heures (température ambiante). Ensuite, les échantillons sont rincés deux fois avec de l'eau distillée, séchés (80 ° C) et pesés (en suivant la méthode de Bartoli & Wilding 1980).

Concernant notre étude, nous avons utilisé la première fraction du silicium qui est le silicium mobile vue la contrainte de temps qu'on avait alors que les autres fractions du sol sont toujours en cours de réalisation et on va les recevoir vers la fin de 2018.

VIII. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Les résultats des analyses physico-chimiques ont été saisis à l'aide du tableur Microsoft Excel 2013. Et ils ont été soumis à des analyses statistiques. En premier lieu, une analyse descriptive a été effectuée par le Logiciel SPSS statistics 20 pour présenter les différentes caractéristiques (la moyenne, l'écart-type et la médiane) de chaque paramètre du sol. En deuxième lieu, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour déterminer si la variation des paramètres du sol entre les échantillons est significative ou non. Et en dernier lieu, les résultats ont subi un test de corrélation et de régression linéaire multiple par le logiciel SPSS statistics 20 pour révéler les différentes corrélations et prédire l'équation qui relie entre la teneur en silicium mobile et les paramètres du sol corrélés avec elle.

RESULTATS ET DISCUSSION

I. PRESENTATION DES RESULTATS

Les tableaux 10 et 11 montrent les différentes classes, sous-classe, groupe, sous-groupe et famille des sols échantillonnés avec leurs références du terrain.

Les sols isohumiques échantillonnés au niveau de la station expérimentale de l'INRA à Sid El Ayedi, ont été nommé (SA_irr), (SA).

Dans la région de Meknès, les échantillons prélevés de la ferme ont été nommé FS2 pour sols à sesquioxyde de fer et FV1 pour vertisols (FS2). Au niveau de la station expérimentale de l'INRA *Merchouch*, on a un vertisol(SM).

Tableau 10. Les sols échantillonnés dans la région de Settat

Classe	Sous_Classe	Groupe	Sous_Groupe	Famille	Référence
C	Sols carbonates	Rendzines	Riche calcaire actif	Marno-calcaire	SC3
			Pauvre calcaire actif	Calcaires gréseux encroutés	SC10
		Brun calcaire	Formations superficielles limoneuses	Formations superficielles limoneuses	SC11
			limon rouge	rouges	SC8
S	Fersialitiques	A réserve calcique	Modaux	Format. Sable et/ou calcaires siliceux	SS2
					SS3
I	Pedoclimat frais en saison pluvieuses	Chatains	Modaux	Formations superficielles rouges	SI6
					SI7
			Encroûtée		SI2
					SI8
		Sols bruns subtropicaux	Vertiques	Formations superficielles limoneuses rouges	SA
			SA_Irr		
				SI4	
				SI5	
V	A drainage externe possible	Structure arrondie	Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques	SV1
					SV2
			Formations superficielles limoneuses rouges	SV5	

C : calcimagnésique, **S** : sesquioxyde de fer, **I** : isohumique, **V** : vertisol

Tableau 11. Les sols échantillonnés dans la région de Meknès

Class e	Sous_Classe	Groupe	Sous-groupe	Famille	Référence	
C	Carbonates	Brun calcaire	A croute en encroutement	Encroutement et limons calcaires, gres et sables calcaires	MC2	
						MC3
			Modal		Formations calcaires á facies variable	MC1
						MC4
						MC5
S	Fersialitiques	A réserve calcique	Modal	Calcaire lacustre	MS1	
					MS2	
					MS3	
					MS4	
					FS2	
I	A pédo-climat frais pendant une saison de l'année	Marrons Marrons	Vertiques	Formations calcaires á facies variable Calcaires lacustres, grès calcaires	MI1	
			Modaux		MI2	
V	A drainage externe possible	A structure Anguleuse	Vertiques	Marnes du tortonien	MV2	
						MV6
		A structure arrondie		Encroutement calcaires et limon calcaire	MV1	
					MV3	
					MV4	
		FV1				
		SM				
CC	Non climatiques	Apport colluvial	Vertiques	Colluvions calcaires sur lits de galets	SCMPLX1	

C : calcimagnésique, **S** : sesquioxyde de fer, **I** : isohumique, **V** : vertisol, **CC**: complexe de sol, **M** : Sol du merchouch

1. CONSTITUANTS PHYSIQUES DES SOLS ETUDIÉS

Pour la zone d'étude de Meknès, l'analyse granulométrique (tableau 12) montre la dominance de la fraction argileuse dans les vertisols, les sols calcimagnésiques, les complexes de sol et les sols isohumiques, alors que les sols à sesquioxydes de fer sont riches en limons. Du point de vue quantitatif, ce sont en général les vertisols qui sont les plus riches en fraction argileuse (52%). Les sols à sesquioxydes de fer renferment la plus faible proportion d'argiles en surface (aux alentours de 20% et 30%).

Quant à Settât, il s'avère que la majorité des classes de sols est dominée par la fraction limoneuse dans les sols calcimagnésiques et les sols isohumiques à part les vertisols qui se caractérisent par une fraction argileuse élevée (45%) (Tableau 13)

2. CARACTERISATION CHIMIQUE DES SOLS ETUDIÉS

Les résultats relatifs à la teneur en pH, conductivité électrique (1/5), calcaire total, matière organique, bases échangeables, capacité d'échange cationique (*CEC*) et en Si mobile sont présentés dans les lignes suivantes.

2.1. pH du sol

La mesure du pH d'un sol permet de définir son état d'acidité ou d'alcalinité (ou statut acido-basique). Les figures (35) et (36) montrent le différent pH des sols échantillonnés dans les zones d'étude de Meknès et Settât.

Les valeurs de pH de Meknès et Settât varient de 6.3 et 8.2 dont la majorité des sols est neutre (pH ≈ 7) à savoir : SV5, SI4, SV3, SS2, SV1, SV2, MS2, SC3, MI2, MV1, MV4, SC11, SI7 Or le groupe des sols acides sont : MS3, SI2, SM. Alors que les sols basiques sont : MC3, MS4, SC4, MC4, MV6, SI6, MC2, MC1, MC5, FS2, MI1, SCMPLX, SC9, SS3, S-SA, MV2, FV1, S-SA-irr, SC8, SI8, SI5, MS1, SC10.

2.2. Conductivité électrique

La conductivité électrique des sols détermine leur degré de salinité. Les figures 35 et 36 montrent la variation de la conductivité électrique pour les différents types de sol de la région de Meknès et de Settât.

Tableau 12. Résultats de la granulométrie des cinq classes de sols étudiés de Meknès

	Référence	% Argile	% Limon	% Sable	Texture
Sols calcimagnésiques	MC2	43.59	33.04	23.36	Argile
	MC3	46,59	22,97	30,45	
	MC1	36,43	29,6	33,96	Limons argileux
	MC4	49,93	34,47	15,6	Argile
	MC5	40,78	30,93	28,29	
Sols à sesquioxydes de fer	MS1	12.3	41.35	46.36	Limons
	MS2	24.49	55.76	19.75	Limons fins
	MS3	14,04	34,14	51,82	Limons
	MS4	31	24,41	44,58	Limons argileux
	FS2	34,73	25,84	39,43	
Sols isohumiques	MI1	38.03	37.82	24.16	
	MI2	55,17	34,44	10,39	Argile
Vertisols	MV2	51.49	43.18	5.33	Argile sableuse
	MV6	48.17	44.55	7.28	
	MV1	49,29	21,59	29,12	Argile
	MV4	54,63	31,41	13,96	
	FV1	51,92	30,24	17,83	
Complexes de sols	SCMPLX1	56,47	37,8	5,73	
Sol de Merchouch	SM	55.68	34.64	9.68	

Tableau 13. Résultats de la granulométrie des cinq classes de sols étudiés de Settat

	Référence	% Argile	% Limon	% Sable	Texture
Sols calcimagnésiques	SC4	24.91	35.92	39.17	Limon
	SC3	23.17	61.81	15.02	Limon fin
	SC10	40.01	20.92	39.07	Argile
	SC9	31.19	29.06	39.75	Limon argileux
	SC11	25.31	14.07	60.63	Limon ariglo-sableux
	SC8	42.19	37.57	20.24	Argile
Sols à sesquioxydes de fer	SS2	33.15	28.1	38.74	Limon argileux
	SS3	45.93	21.52	32.55	Argile
Sols isohumiques	SI6	30.09	27.81	42.1	Limon argileuse
	SI7	32.17	9.01	58.83	Limon argilo-sableux
	SI2	24.1	43.87	32.03	Limon fin
	SI8	20.67	26.69	52.64	Limon argilo-sableux
	SI4	42.88	38.11	19.02	Argile
	SI5	28.05	41.85	30.09	Limon argileux
	SA	41.88	42.08	16.04	Argile sableuse
	SA_irr	41.31	40.43	18.26	
Vertisols	SV1	32.53	49.48	17.98	Limon argileux fin
	SV3	48.66	34	17.14	
	SV2	49.92	22.92	31.48	Argile
	SV5	41.88	24.57	25.51	

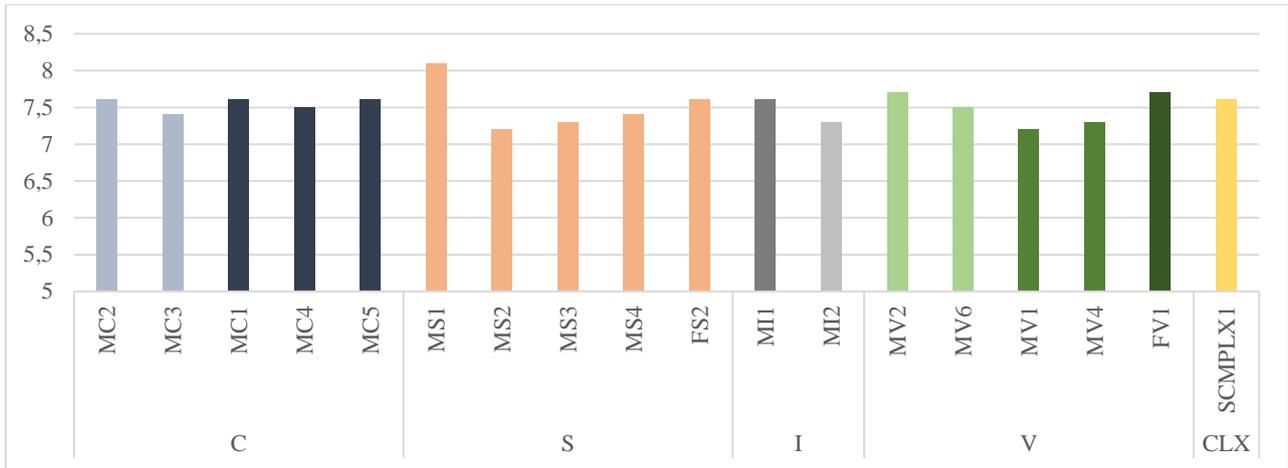


Figure 35 : Variation du pH des échantillons de sols de Meknès

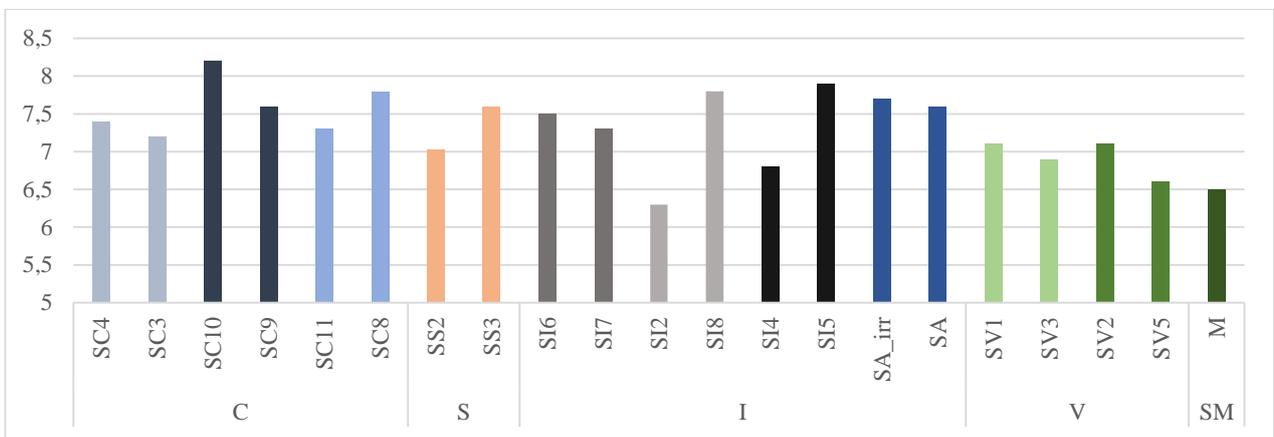


Figure 36 : Variation du pH des échantillons de sols de Settat

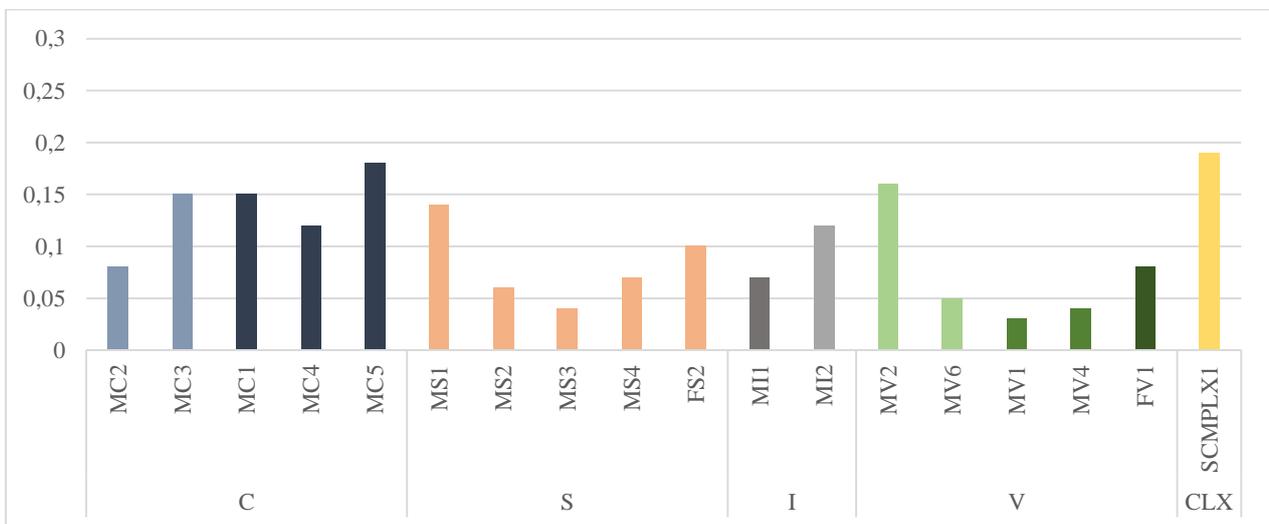


Figure 37 : Conductivité électrique des différents sols de Meknès (ds/m)

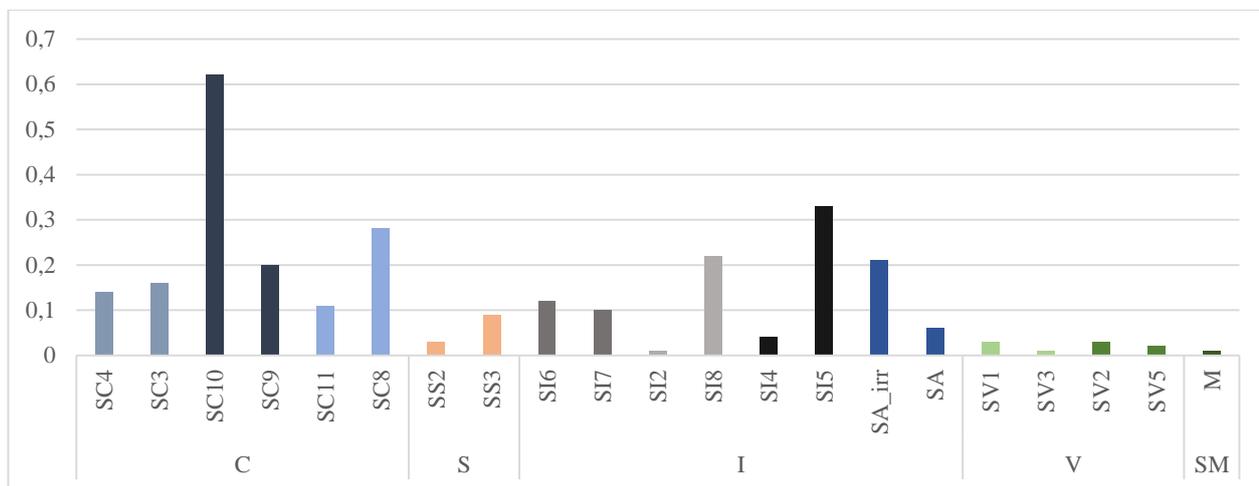


Figure 38 : Conductivité électrique des différents sols de Settat (ds/m)

Ces figures indiquent des fluctuations importantes au niveaux de la teneur en CE pour les différents échantillons de sol, ceux-ci peuvent être regroupés comme suit :

- Groupe 1 : regroupe les sols SC10 et SI5 présentant 0.62 et 0.33 dS/m respectivement, d'où ils appartiennent à la classe des sols salins
- Groupe 2 : regroupe les sols SC8, SI8, SA-irr, SC9, CLX, MC5, MV2, SC3, MC3, MC1, MS1, SC4, MC4, MI2, SI6, SC11, FS2 et SI7. Leur teneur varie entre 0.28 et 0.1 dS/m, donc ces sols sont peu salins.
- Groupe 3 : regroupe les sols SS3, MC2, FV1, MS4, MI1, MS2, SA, MV6, MS3, MV4, SI4, MV1, SS2, SV1, SV2, SV5, SI2, SV3 et SM qui ont des valeurs faibles vis-à-vis des autres groupes d'où ils sont non salins.

En général, la conductivité électrique, pour la région de Meknès, varie entre 0,03 à 0,19 dS/m. Alors que pour la région de Settat, elle varie entre 0.01 et 0.62 dS/m. Cette valeur maximale est obtenue au niveau de SC10 (région de Settat). Le même échantillon montre aussi une valeur élevée de pH,

2.3. Calcaire total

Le calcaire total groupe les carbonates insolubles des sols, ceux des carbonates de calcium et de magnésium. Les figures 37 et 38 montrent la variation du calcaire total au niveau des différents sols de la région de Meknès et de Settat.

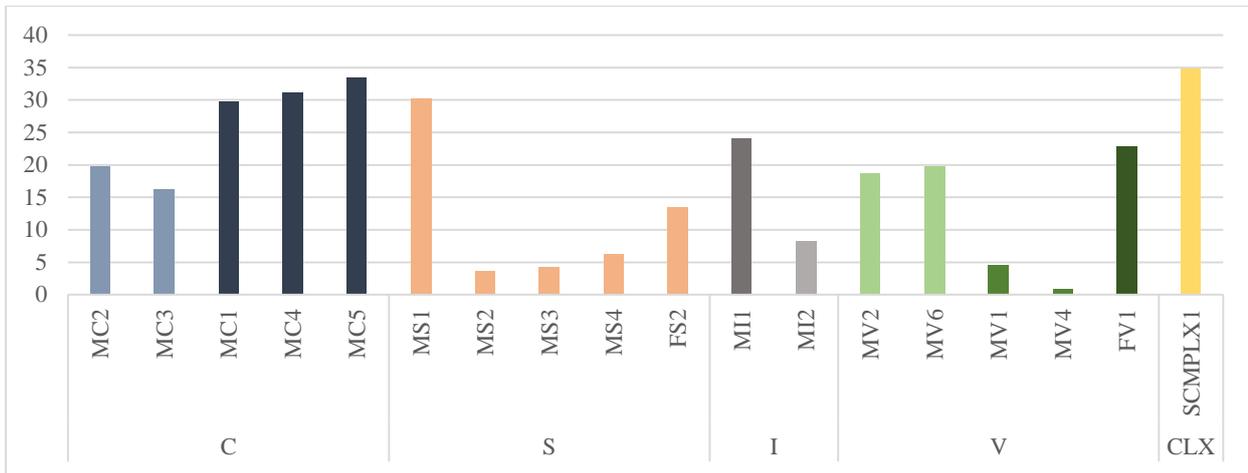


Figure 39 : Variation du calcaire total selon les sols de Meknès (%)

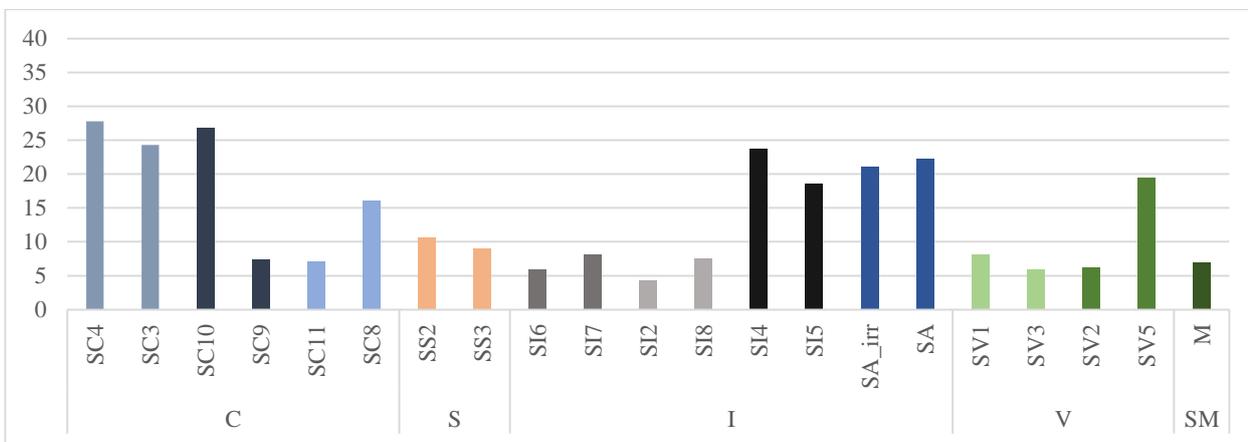


Figure 29 : Variation du calcaire total selon les sols de settat (%)

Ces figures indiquent aussi des fluctuations importantes au niveau de la teneur du calcaire total pour les différents échantillons de sol, ceux-ci peuvent être regroupés comme suit :

- Groupe 1 : regroupe les sols CLX, MC5, MC4, MS1, MC1, SC4 et SC10 présentant des pourcentages en CaCO₃ plus élevés (34%). C'est ainsi que ces sols sont fortement calcaires.
- Groupe 2 : regroupe les sols SC3, MI1, SI4, FV1, SA, SA_irr, MV6, MC2, SV5, MV2, SI5, MC3, SC8, FS2, SS2, SS3, MI2, SV1, SI7, SI8, SC9, SC11, SM, SV2, MS4, SI6 et SV3 qui ont des valeurs qui varient entre 5 et 25% d'où ils sont moyennement calcaires.
- Groupe 3 : regroupe les sols MV1, SI2, MS3, MS2 et MV4 considérés peu calcaires vu leurs faibles teneurs.

Les valeurs maximales pour les deux régions caractérisent les sols calcimagnésiques, ceci est dû à leur abondance en carbonate de calcium ou de magnésium.

Pour les échantillons prélevés à Sid El Ayedi (SA et SA-irr), il apparait clairement qu'ils varient dans les mêmes alentours (21%).

Cependant, on observe qu'il y a une différence entre la teneur en calcaire total des deux échantillons pris de la ferme. FV1, appartenant à la classe des vertisols est fortement calcaire par rapport à FS2 qui appartient à la classe des sols à sesquioxydes de fer, considéré moyennement calcaire.

2.4. Matière organique

Les résultats de la caractérisation de la matière organique des différents échantillons, sont présentés dans les figures suivantes :

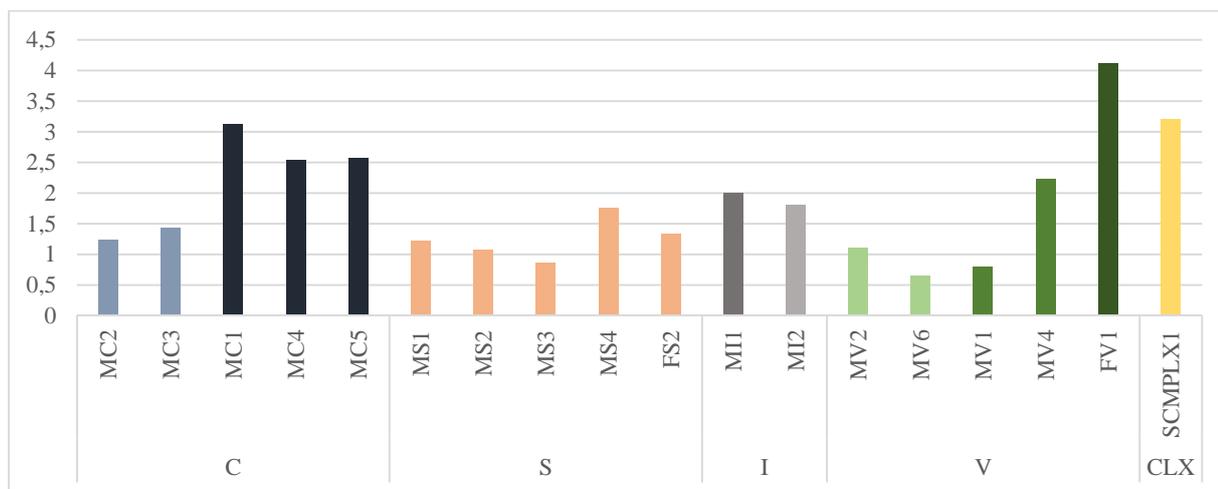


Figure 41 : Distribution de la teneur en matière organique selon les sols de Meknès (%)

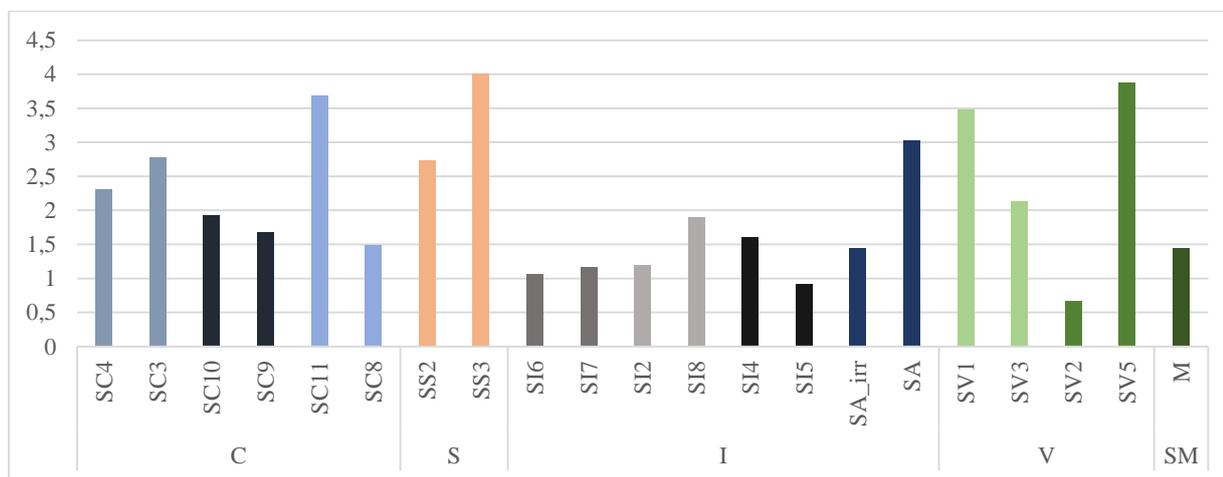


Figure 42 : Distribution de la teneur en matière organique selon les sols de Settat (%)

D'après les figures en dessus, il apparait que la teneur en matière organique varie pour les différents échantillons de sol, ceux-ci peuvent être regroupés selon 4 groupes :

- Groupe 1 : contient les sols FV1 et SS3 qui ont une teneur supérieure à 4, d'où ils sont riches en matière organique.
- Groupe 2 : regroupe les sols SV5, SC11, SV1, CLX, MS1, SA, SC3, SS2, MC5, MC4, SC4, MV4, SV3 et MI1 qui possèdent une teneur en matière organique entre 2 et 4%, ainsi les sols appartiennent à la classe du sol moyenne en MO.
- Groupe 3 : regroupe les sols SC10, SI8, MI2, MS4, SC9, SI4, SC8, SM, SA_irr, MC3, FS2, MC2, MS1, SI2, SI7, MV2, MS2 et SI6 qui sont pauvres en matière organique vu que leur teneur est inférieure à 2%.
- Groupe 4 : regroupe les restes des sols SI5, MS3, MV1, SV2 et MV6 considérés très pauvres en matière organique.

En général, les sols calcimagnésiques, les sols à sesquioxydes de fer et les sols isohumiques sont moyennement pauvres en MO par rapport aux complexes de sols et à certains vertisols qui constitueront une source principale par excellence d'éléments nutritifs (N, K, P, etc.) dans les sols.

2.5. Bases échangeables

La teneur en bases échangeables pour chaque sol étudié des deux régions Meknès et Settât est présentée dans les figures 41 et 42

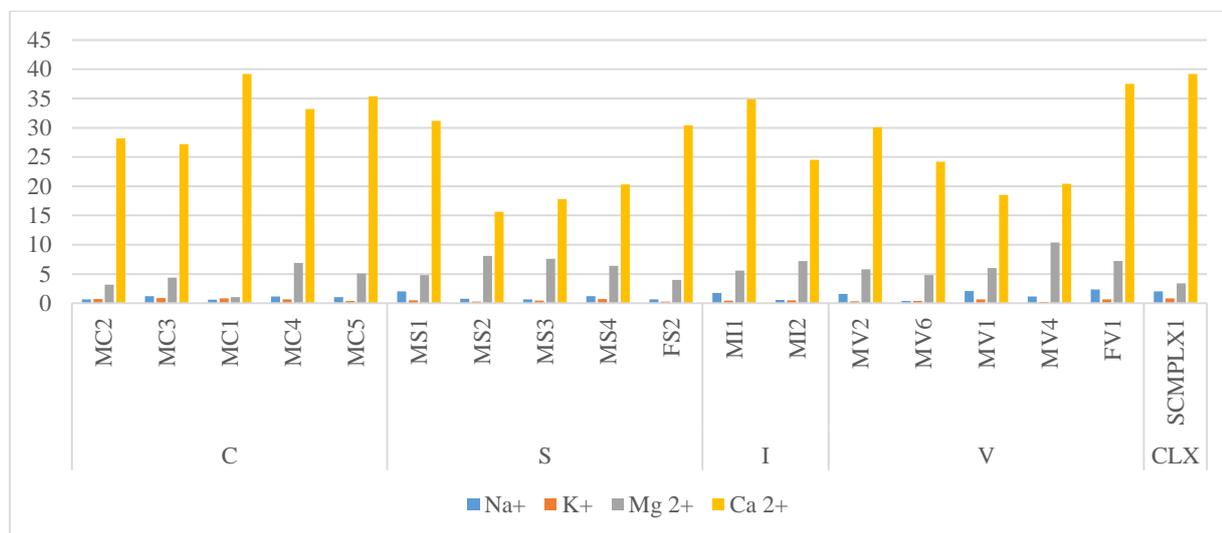


Figure 41. Distribution de la teneur en bases échangeables sur les sols de Meknès (meq/100g)

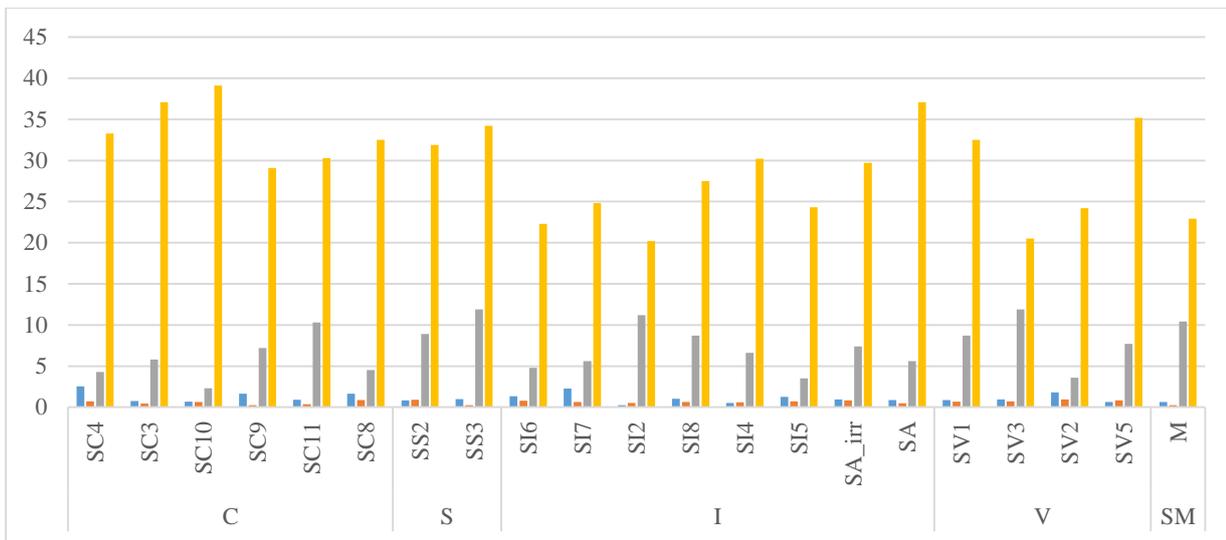


Figure 42. Distribution de la teneur en bases échangeables sur les sols de Settat (méq/100g)

Le calcium est l'élément dominant pour les deux zones d'étude ; il représente un pourcentage élevé des cations échangeables dans tous les sols, et varie entre 20.2 et 39.1 %. La teneur du potassium et du sodium est faible comparativement aux autres cations.

2.6. Capacité d'échange cationique

Les figures (47) et (48) montrent la distribution de la CEC pour l'ensemble des sols de chaque région d'étude :

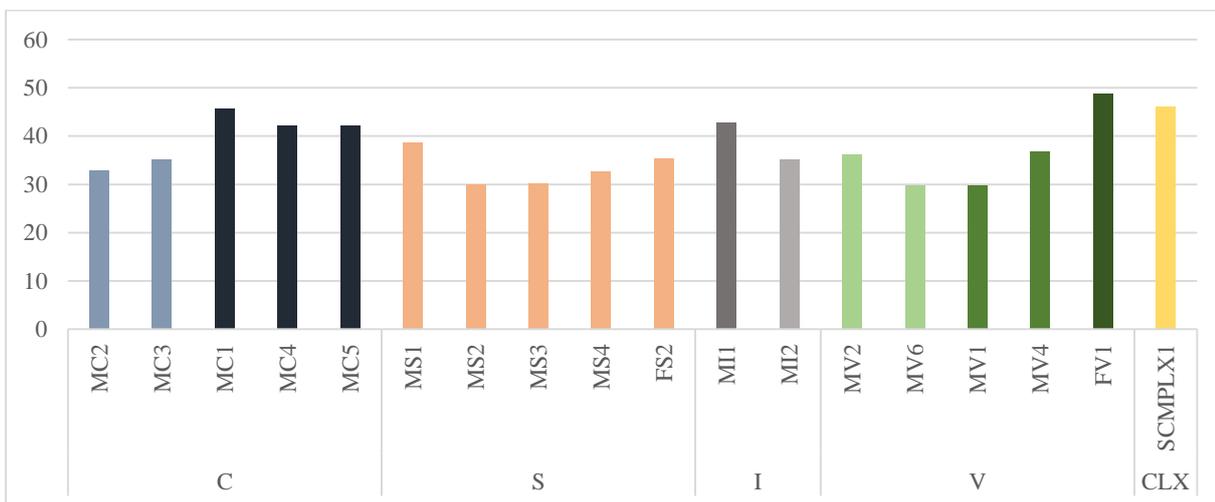


Figure 30: Distribution de la CEC dans la région de Meknès (méq/100g)

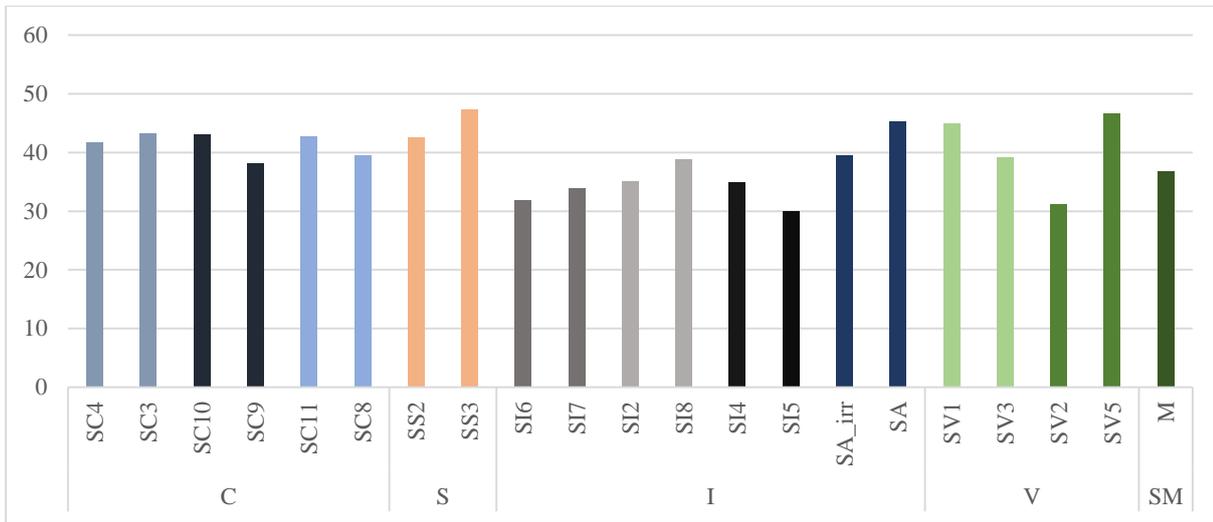


Figure 31: Distribution de la CEC dans la région de Settat (méq/100g)

Pour la zone de Meknès, la CEC varie entre 29,8 et 48,8 méq/100g du sol. Alors que pour Settat, elle varie entre 29,9 et 47,3 méq/100g. D'où tous les sols étudiés des deux régions ont une capacité de rétention des éléments nutritifs forte à très forte.

1.1. Teneur en Silicium

La teneur en silicium mobile dans les deux zones d'études est présentée dans les figures (33) et (34) :

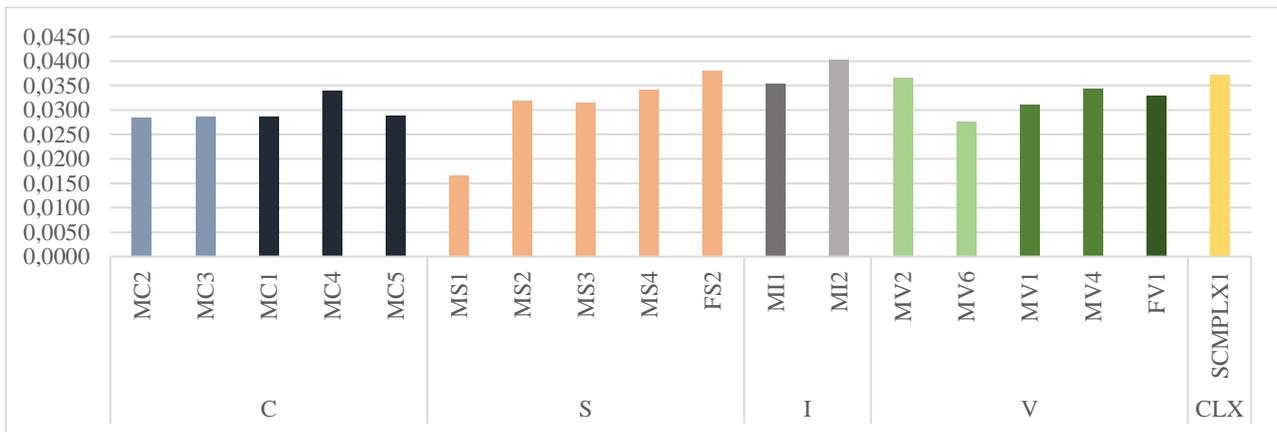


Figure 33 : Variation de la teneur de Si mobile pour chaque échantillon de sol à Meknès (mg/g)

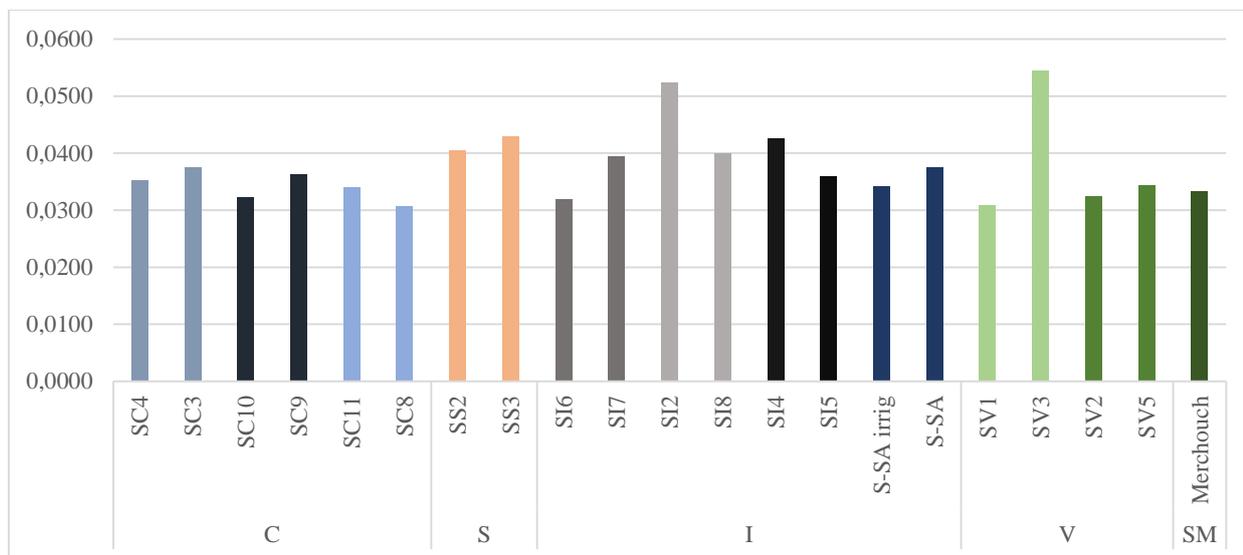


Figure 34 : Variation de la teneur de Si mobile pour chaque échantillon de sol à Settat (mg/g)

La variation de la teneur en Si mobile pour la zone d'étude de Meknès est entre 0.017 à 0.040 mg/g. d'où, la classe des sols isohumiques et la classe complexe de sols possède une teneur plus élevée comparativement aux autres classes. Cependant, la classe des sols calcimagnésiques dispose de la teneur la plus faible à l'égard des autres classes. Néanmoins, en comparant les deux zones d'étude, il s'avère que les sols de la région de Settat ont une teneur en si mobile supérieure à ceux des sols de la région de Meknès, la teneur varie entre 0.031 et 0.055 mg/g. ainsi, la teneur la plus faible en si mobile pour les sols de la région de Settat concerne la classe des sols calcimagnésiques et la teneur la plus élevée concerne la classe des sols isohumiques.

3. ANALYSES STATISTIQUES

3.1. Analyse descriptive

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 des deux zones d'étude (Tableau 17 et 18).

En comparant entre les moyennes des différentes classes de sol de Meknès, on observe qu'il n'y a pas de différence entre certains paramètres à savoir : Si, pH, Mo, pourcentage du limon, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et CEC. Tandis que le sol calcimagnésique a une moyenne de $CaCO_3$ (m=26.08) et de Ca^{2+} (m=32.64) supérieure à celle des autres classes. Quant au pourcentage du sable, les sols à sesquioxyde de fer ont un pourcentage élevé (m=40.39) par rapport aux autres.

Pour le calcaire total, l'écart-type est influencé par les valeurs extrêmes dans les pourcentages de $CaCO_3$; ces valeurs pourraient avoir une grande influence sur les résultats de l'écart-type. Ceci dit, plus il y a d'hétérogénéité, plus l'écart-type correspondra à une valeur élevée.

Pour la teneur en silicium, le pH et la conductivité électrique ainsi que par rapport à la moyenne de l'ensemble des classes de sol, l'écart-type est plus petit. D'où, la dispersion des mesures autour de la moyenne est plus étroite. De ce fait, les résultats sont donc plus cohérents.

De même pour Settat, il n'y a pas de différence entre les moyennes de la teneur en silicium mobile, pH, Mo , pourcentage du limon, K^+ , Ca^{2+} et CEC . La différence est ainsi observée au niveau de la conductivité électrique, taux du calcaire total, pourcentage du sable, pourcentage d'argile, Na^+ et Mg^{2+} . Par exemple, les sols calcimagnésiques ont une moyenne élevée au niveau de la CE ($m=0.25$), $CaCO_3$ ($m=18.27$) et Na^+ ($m=1.36$). En revanche, les vertisols ont une moyenne faible en sable et élevée en argile. Quant aux sols à sesquioxyde de fer, ils possèdent une teneur élevée en Mg^{2+} .

Ainsi que l'écart-type de la plupart des paramètres est influencé par des valeurs extrêmes, d'où l'écart type correspondra à des valeurs élevées.

3.2. Analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (région, classe de sol)

Le test d'ANOVA est réalisé sur les différents paramètres physico-chimiques du sol afin de déterminer si ces paramètres varient significativement entre les classes de sol et entre les deux régions.

Les hypothèses posées sont :

H_0 : le paramètre ne diffère pas significativement entre les classes de sol et entre les régions

H_1 : il y a une différence significative entre les classes de sol et entre les régions

Les résultats d'analyse statistique pour chaque paramètre sont présentés dans les tableaux suivants :

✓ pH du sol

Tableau 14. Analyse de variance du pH du sol

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F à 5%
Cl.Sol	0,12	3	0,04	0,86	0,55	9,28
Région	0,03	1	0,03	0,68	0,47	10,13
Erreur	0,14	3	0,05			
Total	0,30	7				

✓ **Conductivité électrique**

Tableau 15. Analyse de variance de la conductivité électrique du sol

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Degré de liberté</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Valeur critique pour F</i>
Lignes	0,018	3	0,006	3,71	0,16	9,28
Colonnes	0,003	1	0,003	1,94	0,26	10,13
Erreur	0,005	3	0,002			
Total	0,026	7				

✓ **Matière organique**

Tableau 16. Analyse de variance de la matière organique du sol

<i>Source des variations</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Degré de liberté</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Valeur critique pour F</i>
Cl.Sol	0,57	3	0,19	0,30	0,83	9,28
Région	0,45	1	0,45	0,71	0,46	10,13
Erreur	1,89	3	0,63			
Total	2,91	7				

Tableau 17. Analyse descriptive des différentes caractéristiques de Meknès

		Si	pH	CE	CaCO3	MO	Sable	limon	argile	Na	K	Mg	Ca	CEC
C	Moyenne	0,03	7,54	0,14	26,08	2,18	26,33	30,20	43,46	0,94	0,69	4,14	32,64	39,64
	Médiane	0,03	7,60	0,15	29,80	2,54	28,29	30,93	43,59	1,03	0,70	4,40	33,20	42,20
	Ecart-type	0,00	0,09	0,04	7,59	0,81	7,12	4,46	5,20	0,29	0,19	2,17	5,01	5,45
S	Moyenne	0,03	7,32	0,08	11,56	1,25	40,39	36,30	23,31	1,08	0,45	6,18	23,06	33,34
	Médiane	0,03	7,40	0,07	6,30	1,21	44,58	34,14	24,49	0,80	0,48	6,40	20,30	32,60
	Ecart-type	0,01	0,66	0,04	11,12	0,34	12,36	12,84	9,98	0,59	0,18	1,76	7,26	3,68
I	Moyenne	0,04	7,45	0,10	16,15	1,90	17,28	36,13	46,60	1,16	0,50	6,40	29,70	38,95
	Médiane	0,04	7,45	0,10	16,15	1,90	17,28	36,13	46,60	1,16	0,50	6,40	29,70	38,95
	Ecart-type	0,00	0,21	0,04	11,10	0,14	9,74	2,39	12,12	0,82	0,05	1,13	7,35	5,44
V	Moyenne	0,03	7,50	0,07	13,34	1,78	14,70	34,19	51,10	1,53	0,47	6,84	26,14	36,26
	Médiane	0,03	7,50	0,05	18,70	1,11	13,96	31,41	51,49	1,61	0,39	6,00	24,20	36,10
	Ecart-type	0,00	0,20	0,05	9,91	1,45	9,50	9,62	2,51	0,77	0,20	2,17	7,74	7,76

V : vertisol, **S** : sesquioxyde de fer, **I** : Isohumique, **C** : calcimagnésique

Tableau 18. Analyse descriptive des différentes caractéristiques de Settat

		Si	pH	CE	CaCO3	MO	Sable	Limon	Argile	Na	K	Mg	Ca	CEC
C	Moyenne	0,03	7,58	0,25	18,27	2,31	35,65	33,22	31,13	1,36	0,54	5,73	33,57	41,43
	Médiane	0,03	7,50	0,18	20,20	2,12	39,12	32,49	28,25	1,28	0,53	5,15	32,90	42,30
	Ecart-type	0,00	0,37	0,19	9,44	0,81	16,30	16,61	8,21	0,71	0,24	2,77	3,87	2,10
S	Moyenne	0,04	7,31	0,06	9,85	3,38	35,65	24,81	39,54	0,90	0,58	10,40	33,05	44,90
	Médiane	0,04	7,31	0,06	9,85	3,38	35,65	24,81	39,54	0,90	0,58	10,40	33,05	44,90
	Ecart-type	0,00	0,41	0,04	1,06	0,90	4,38	4,65	9,04	0,11	0,47	2,12	1,63	3,39
I	Moyenne	0,04	7,36	0,14	13,94	1,54	33,62	33,73	29,93	1,05	0,64	6,68	27,01	36,16
	Médiane	0,04	7,55	0,11	13,35	1,32	31,05	39,27	31,13	0,97	0,64	6,10	26,15	35,00
	Ecart-type	0,01	0,55	0,11	8,18	0,68	16,22	11,94	13,58	0,61	0,12	2,42	5,35	4,86
V	Moyenne	0,04	6,93	0,02	9,98	2,54	23,03	32,74	43,25	1,06	0,78	7,98	28,10	40,43
	Médiane	0,03	7,00	0,03	7,25	2,81	21,75	29,29	45,27	0,91	0,77	8,20	28,35	42,00
	Ecart-type	0,01	0,24	0,01	6,43	1,46	6,78	12,18	7,97	0,51	0,12	3,42	6,90	7,00
V	:	vertisol,	S	:	sesquioxyde	de	fer,	I	:	Isohumique,	C	:	calcimagnésique	

✓ **CEC**

Tableau 14. Analyse de variance de la capacité d'échange cationique du sol

<u>Source des variations</u>	<u>Somme des carrés</u>	<u>Degré de liberté</u>	<u>Moyenne des carrés</u>	<u>F</u>	<u>Probabilité</u>	<u>Valeur critique pour F</u>
Cl.sol	9,68	3	3,23	0,18	0,90	9,28
Région	27,11	1	27,11	1,51	0,31	10,13
Erreur	53,87	3	17,96			
Total	90,65	7				

✓ **Silicium mobile**

Tableau 15. Analyse de variance de si mobile du sol

<u>Source des variations</u>	<u>Somme des carrés</u>	<u>Degré de liberté</u>	<u>Moyenne des carrés</u>	<u>F</u>	<u>Probabilité</u>	<u>Valeur critique pour F</u>
Cl.Sol	5,6513E-05	3	1,8838E-05	1,53	0,37	9,28
Région	3,7361E-05	1	3,7361E-05	3,02	0,18	10,13
Erreur	3,7056E-05	3	1,2352E-05			
Total	0,00013093	7				

Selon les résultats obtenus d'ANOVA pour pH, CE, Mo, CEC et Si mobile, nous observons que :

F Cl. Sol calculé < F de Fisher à 5% dl (3,3) et F région calculé < F de Fisher à 5% dl (1,3) donc : H0 est acceptée, d'où les valeurs de ces paramètres ne diffèrent significativement ni entre les classes de sol ni entre les régions.

En revanche, le taux du calcaire diffère significativement entre les classes de sol pour les deux régions (Tableau 21).

✓ **Calcaire total**

Tableau 16. Analyse de variance du calcaire total du sol

<u>Source des variations</u>	<u>Somme des carrés</u>	<u>Degré de liberté</u>	<u>Moyenne des carrés</u>	<u>F</u>	<u>Probabilité</u>	<u>Valeur critique pour F</u>
Cl.Sol	162,07	3	54,02	13,98	0,03	9,28
Région	28,50	1	28,50	7,38	0,07	10,13
Erreur	11,59	3	3,86			
Total	202,16	7				

De ce fait, la comparaison des multiples moyennes (Test Duncan) a été appliquée pour voir la classe qui diffère significativement par rapport aux autres classes. Dans notre cas, les sols calcimagnésiques sont les plus fortement calcaires pour les deux régions

3.3. Variation de silicium mobile en fonction des paramètres physico-chimiques

Pour répondre aux objectifs de cette étude, nous avons réalisé une analyse de régression linéaire afin d'aboutir à une équation prédictive de la teneur de Si en fonction des paramètres du sol.

Avant de procéder à ce test, il est nécessaire que les variables indépendantes et dépendantes soient corrélées. D'où, une matrice de corrélation a été établie.

3.3.1. Matrice de corrélation

a) Pour l'ensemble des échantillons de sol

L'annexe 4 concerne les corrélations entre les variables étudiées pour l'ensemble des échantillons. Nous voyons qu'il y a une corrélation significative ($p < 0.05$) entre la teneur en Si mobile et le pH, calcaire total et la teneur en Mg^{2+} .

Selon le coefficient de Pearson, la teneur en Si mobile est corrélée positivement à la teneur en Mg^{2+} et négativement au calcaire total ainsi qu'au pH. Cette corrélation au dernier paramètre est conforme aux résultats obtenus par des chercheurs (Liang et Marselov., 2015). D'où, on peut conclure que la teneur en Si mobile diminue lorsque le taux du $CaCO_3$ et le pH augmentent. Cependant, lorsque la teneur en Mg^{2+} augmente, la teneur en Si mobile dans le sol augmente aussi (Annexe 3). D'après la littérature scientifique, la teneur en Si disponible dans le sol est positivement corrélée avec la teneur en Ag (Wan et al., 1993 ; Zhang et al., 1996 et Dai et al., 2004). Dans notre cas cette corrélation n'a pas été observée.

b) Par chaque classe de sol

Pour la région de Meknès

✓ Classe des sols calcimagnésiques

La matrice de corrélation (Tableau 22) présente les différentes corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques du sol pour la classe des sols calcimagnésiques.

A partir du tableau 22, il existe une forte corrélation positive entre la teneur en silicium et le pourcentage d'argile ($r=0.67$) ainsi que la teneur en Mg^{2+} ($r=0.72$). De plus, la teneur du silicium mobile est corrélée négativement au pourcentage du sable ($r= -0.83$).

✓ Classe des sols à sesquioxydes de fer

La matrice de corrélation (Tableau 23) présente les différentes corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques du sol pour la classe des sols à sesquioxydes de fer.

D'après le tableau 23, on observe des corrélations négatives entre la teneur en silicium et la conductivité électrique ($r=-0.62$), calcaire total ($r= -0.78$), Na^+ ($r=-0.88$) et CEC ($r=-0.57$). Ainsi qu'une forte corrélation positive apparaît entre la teneur en silicium et le pourcentage d'argile ($r=0.88$).

✓ Classe des vertisols

La matrice de corrélation (Tableau 24) suivante présente les différentes corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques du sol pour la classe des vertisols.

La teneur en Si mobile, pour cette classe de sol, est corrélée positivement avec la conductivité électrique ($r=0.66$), le pourcentage d'argile ($r=0.74$).

Remarque :

Cependant, on n'a pas pu faire une matrice de corrélation pour la classe des sols isohumiques et les complexes du sol vu qu'on n'a pas assez d'échantillons.

Pour la région de Settat :

✓ Classe des sols calcimagnésiques

La matrice de corrélation (Tableau 25) présente les différentes corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques du sol pour la classe des sols calcimagnésiques.

Le tableau 25 montre qu'il existe une forte corrélation négative entre la teneur en Si mobile et le pH ($r = -0.70$), la conductivité électrique ($r = -0.54$) et le K^+ ($r = -0.70$). Ainsi qu'une forte corrélation positive avec le pourcentage d'argile ($r = 0.84$)

✓ Classe des sols isohumiques

La matrice de corrélation (Tableau 26) présente les différentes corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques du sol pour la classe des sols isohumiques

La teneur en Si mobile est fortement corrélée négativement avec le pH ($r = -0.84$), la conductivité électrique ($r = -0.56$), la teneur en K^+ ($r = -0.68$). Ainsi qu'elle est corrélée positivement à la teneur en Mg^{2+} ($r = 0.78$).

Tableau 17. Matrice de corrélation pour la classe des sols calcimagnésiques

	Si mobile	pH	CE	CaCO3	MO	% sable	% limon	% argile	(Na+)	K+	Mg2+	Ca2+	CEC
Si mobile	1												
pH	-0,23	1											
CE	-0,18	-0,09	1										
CaCO3	0,43	0,54	0,44	1									
MO	0,29	0,40	0,54	0,88	1								
% sable	-0,83	0,10	0,55	-0,16	0,16	1							
% limon	0,54	0,64	-0,45	0,58	0,28	-0,69	1						
% argile	0,67	-0,68	-0,36	-0,28	-0,46	-0,78	0,08	1					
(Na+)	0,49	-0,76	0,31	-0,05	-0,18	-0,40	-0,26	0,77	1				
K+	-0,15	-0,48	-0,30	-0,65	-0,24	0,30	-0,52	0,03	-0,18	1			
Mg2+	0,72	-0,42	0,04	0,20	-0,12	-0,76	0,25	0,83	0,86	-0,48	1		
Ca2+	0,11	0,58	0,50	0,85	0,97	0,28	0,30	-0,65	-0,38	-0,25	-0,30	1	
CEC	0,31	0,33	0,58	0,87	1,00	0,17	0,23	-0,43	-0,11	-0,22	-0,08	0,95	1

Tableau 18. Matrice de corrélation pour la classe des sols à sesquioxydes de fer

	<u>Si mobile</u>	<u>pH</u>	<u>CE</u>	<u>CaCO3</u>	<u>MO</u>	<u>% sable</u>	<u>% limon</u>	<u>% argile</u>	<u>(Na+)</u>	<u>K+</u>	<u>Mg2+</u>	<u>Ca2+</u>	<u>CEC</u>
Si mobile	1												
pH	-0,45	1,00											
CE	-0,62	0,92	1,00										
CaCO3	-0,78	0,78	0,96	1,00									
MO	0,21	0,51	0,25	0,07	1,00								
% sable	-0,23	-0,14	0,13	0,31	0,06	1,00							
% limon	-0,40	0,00	-0,04	0,00	-0,57	-0,69	1,00						
% argile	0,80	0,17	-0,10	-0,38	0,65	-0,35	-0,44	1,00					
(Na+)	-0,88	0,70	0,76	0,83	0,27	0,28	0,10	-0,47	1,00				
K+	-0,28	0,03	0,02	0,11	0,53	0,63	-0,46	-0,19	0,51	1,00			
Mg2+	0,14	-0,72	-0,81	-0,72	-0,38	-0,33	0,53	-0,27	-0,36	0,04	1,00		
Ca2+	-0,36	0,75	0,90	0,86	0,23	0,34	-0,37	0,04	0,50	-0,05	-0,97	1,00	
CEC	-0,57	0,85	0,97	0,95	0,29	0,34	-0,25	-0,10	0,73	0,13	-0,89	0,96	1,00

✓ Classe des vertisols

La matrice de corrélation (Tableau 27) présente les différentes corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques du sol pour la classe des vertisols

Il existe des corrélations positives entre la teneur en Si mobile et le pourcentage d'argile ($r=0.5$), ainsi qu'avec la teneur en Mg^{2+} ($r=0.75$). D'autres corrélations négatives sont à prendre en considération, la teneur en Si mobile avec la conductivité électrique ($r=-0.92$), la teneur en Ca^{2+} ($r=-0.7$) et le pourcentage de sable ($r=-0.53$).

c) Par région

Au niveau de la région de Meknès, la teneur en Si mobile est corrélée positivement à la teneur en argile ($r=0.51$). Contrairement à la région de Settat, aucune corrélation n'a été observé. (Matrice de corrélation sur Annexe 3)

1.3.2. Régression linéaire

Un modèle de régression linéaire est un modèle qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable, dite expliquée, et une ou plusieurs variables, dites explicatives.

Cette analyse a été effectuée à l'aide du logiciel SPSS statistics 20 pour prédire l'équation qui relie entre la teneur en silicium mobile et les paramètres du sol corrélés avec elle.

Le coefficient de détermination et le coefficient de corrélation sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 24. Coefficient de corrélation et coefficient de détermination

Modèle	R	R ²	R ² ajusté	Erreur standard de l'estimation	Variation de R ²	Changement dans les statistiques			
						Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F
1	0,604 ^a	0,365	0,288	0,00554	0,365	4,740	4	33	0,004

a. Valeurs prédites : (constantes), Mg, pH, CaCO₃

- Le coefficient de corrélation, $R=0.604$, indique que les variables sont en relation.
- Le coefficient de détermination, $R^2=0.365$, indique que le Mg, pH et CaCO₃ expliquent la teneur en silicium dans un pourcentage de 36%. D'où, 64% qui reste, est expliqué par d'autres paramètres.

Donc, il est possible de construire l'équation de régression pour prédire une valeur de Y.

L'équation de base était la suivante : $Y_i : (b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n) + \epsilon_i$

Tableau 25. Modèle de régression

Modèle	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	T	Signification
	A	Erreur standard	Bêta		
(Constante)	0,056	0,021		2,704	0,011
pH	-0,004	0,003	-0,241	-1,453	0,156
CaCO3	4,558E-005	0,000	0,068	0,370	0,714
Mg	0,001	0,000	0,489	2,702	0,011

Remplaçons maintenant les b par les coefficients fournis dans le tableau ci-dessous :

$$\text{Teneur en Si} = (-0.004 * \text{pH} + 0.001 * \text{Mg} + (4.558\text{E}-005) * \text{CaCO}_3 + 0.056$$

Tableau 26. Matrice de corrélation pour la classe des vertisols (Meknès)

	<i>Si mobile</i>	<i>pH 2</i>	<i>CE</i>	<i>CaCO3</i>	<i>MO</i>	<i>% sable</i>	<i>% limon</i>	<i>% argile</i>	<i>(Na+)</i>	<i>K+</i>	<i>Mg2+</i>	<i>Ca2+</i>	<i>CEC</i>
Si mobile	1												
pH 2	0,30	1											
CE	0,66	0,81	1										
CaCO3	-0,12	0,91	0,56	1									
MO	0,29	0,38	0,04	0,25	1								
% sable	-0,19	-0,52	-0,61	-0,50	0,14	1							
% limon	-0,01	0,53	0,57	0,59	-0,28	-0,97	1						
% argile	0,74	-0,05	0,13	-0,37	0,57	-0,08	-0,18	1					
(Na+)	0,44	0,24	0,16	0,02	0,56	0,62	-0,68	0,23	1				
K+	-0,29	0,14	-0,22	0,23	0,35	0,73	-0,62	-0,39	0,73	1			
Mg2+	0,46	-0,39	-0,27	-0,61	0,50	0,14	-0,37	0,92	0,12	-0,33	1		
Ca2+	0,28	0,93	0,61	0,83	0,69	-0,32	0,28	0,13	0,42	0,30	-0,15	1	
CEC	0,43	0,59	0,30	0,41	0,97	-0,02	-0,13	0,55	0,59	0,30	0,37	0,83	1

Tableau 27. Matrice de corrélation pour la classe des sols calcimagnésiques (Settat)

	<i>Si mobile</i>	<i>pH 2</i>	<i>CE</i>	<i>CaCO3</i>	<i>MO</i>	<i>% sable</i>	<i>% limon</i>	<i>% argile</i>	<i>(Na+)</i>	<i>K+</i>	<i>Mg2+</i>	<i>Ca2+</i>	<i>CEC</i>
<i>Si mobile</i>	1												
<i>pH 2</i>	-0,70	1											
<i>CE</i>	-0,54	0,93	1										
<i>CaCO3</i>	0,00	0,21	0,40	1									
<i>MO</i>	0,35	-0,65	-0,48	-0,18	1								
<i>% sable</i>	-0,05	-0,03	-0,09	-0,45	0,51	1							
<i>% limon</i>	0,46	-0,41	-0,28	0,44	-0,14	-0,88	1						
<i>% argile</i>	0,84	0,90	0,75	0,02	-0,72	-0,21	-0,28	1					
<i>(Na+)</i>	0,03	-0,16	-0,40	0,09	-0,35	0,00	0,05	-0,10	1				
<i>K+</i>	-0,70	0,41	0,32	0,57	-0,43	-0,39	0,12	0,54	0,36	1			
<i>Mg2+</i>	0,35	-0,66	-0,71	-0,81	0,68	0,54	-0,25	-0,55	-0,13	-0,68	1		
<i>Ca2+</i>	-0,09	0,38	0,66	0,84	-0,08	-0,44	0,34	0,19	-0,45	0,36	-0,72	1	
<i>CEC</i>	0,10	-0,15	0,17	0,53	0,66	0,12	0,06	-0,36	-0,50	0,04	-0,08	0,67	1

Tableau 28. Matrice de corrélation pour la classe des sols isohumiques (Settat)

	Si mobile	pH 2	CE	CaCO3	MO	% sable	% limon	% argile	(Na+)	K+	Mg2+	Ca2+	CEC
Si mobile	1												
pH 2	-0,84	1											
CE	-0,56	0,80	1										
CaCO3	-0,30	0,26	0,14	1									
MO	-0,01	0,16	-0,30	0,42	1								
% sable	0,02	0,10	0,11	-0,79	-0,34	1							
% limon	0,19	-0,15	0,04	0,49	0,19	-0,86	1						
% argile	-0,30	0,01	-0,27	0,82	0,38	-0,70	0,23	1					
(Na+)	-0,52	0,48	0,31	-0,22	-0,26	0,66	-0,84	-0,08	1				
K+	-0,68	0,49	0,61	-0,04	-0,60	0,10	-0,15	0,01	0,38	1			
Mg2+	0,78	-0,62	-0,44	-0,39	0,07	0,02	0,21	-0,32	-0,59	-0,35	1		
Ca2+	-0,28	0,34	-0,08	0,76	0,87	-0,52	0,21	0,70	-0,12	-0,31	-0,21	1	
CEC	0,02	0,13	-0,28	0,35	0,92	-0,36	0,20	0,39	-0,28	-0,43	0,29	0,81	1

Tableau 29. Matrice de corrélation pour la classe des vertisols (Settat)

	<i>Si mobile</i>	<i>pH 2</i>	<i>CE</i>	<i>CaCO3</i>	<i>MO</i>	<i>% sable</i>	<i>% limon</i>	<i>% argile</i>	<i>(Na+)</i>	<i>K+</i>	<i>Mg2+</i>	<i>Ca2+</i>	<i>CEC</i>
Si mobile	1												
pH 2	-0,19	1											
CE	-0,92	0,55	1										
CaCO3	-0,32	-0,87	-0,07	1									
MO	-0,16	-0,57	-0,13	0,70	1								
% sable	-0,53	-0,01	0,48	0,20	-0,50	1							
% limon	-0,03	0,44	0,16	-0,33	0,43	-0,79	1						
% argile	0,50	-0,07	-0,41	-0,26	-0,77	0,46	-0,78	1					
(Na+)	-0,19	0,66	0,46	-0,61	-0,94	0,66	-0,38	0,57	1				
K+	-0,29	-0,07	0,26	0,13	-0,61	0,97	-0,90	0,67	0,68	1			
Mg2+	0,75	-0,27	-0,77	-0,06	0,46	-0,93	0,50	-0,19	-0,71	-0,81	1		
Ca2+	-0,70	-0,42	0,41	0,79	0,80	0,05	0,18	-0,75	-0,55	-0,15	-0,16	1	
CEC	-0,10	-0,57	-0,18	0,67	1,00	-0,55	0,45	-0,75	-0,96	-0,65	0,52	0,76	1

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le but de ce travail est de mettre en évidence les relations qui existent entre les paramètres physico-chimiques du sol et la teneur de silicium mobile dans le sol. Pour atteindre cet objectif, plusieurs champs de blé tendre répartis sur les deux zones d'étude (Meknès et Settat) ont été identifiés, au niveau desquels, des prélèvements de sols ont été réalisés. Par la suite, des analyses physiques et chimiques ont été effectuées dans le laboratoire de l'institut, alors que l'extraction du silicium mobile a été réalisée par une collègue Allemande au laboratoire de l'université de Göttingen. Cependant, cette analyse est toujours en cours pour extraire toutes les fractions du silicium dans le sol. A la fin, la variabilité de teneur en Si avec les paramètres du sol a été testée à l'aide du logiciel SPSS.

La présente étude a abouti à des résultats intéressants parmi lesquels la présence d'une relation entre la teneur en Si mobile et certains paramètres de sol à savoir pH, calcaire total et magnésium pour l'ensemble des échantillons de sols prélevés, étant donné que la différence entre les différentes classes de sol pour chaque paramètre de sol n'a pas été significative. Ces paramètres n'expliquent que 36% de la teneur en Si mobile, alors que les 64% peuvent être expliqués par d'autres paramètres.

D'autres paramètres peuvent être corrélés avec la teneur en silicium mobile si on sépare les échantillons par leurs classes de sol. Ceci nous a permis d'aboutir à un ensemble de constat : Pour la classe des sols calcimagnésiques, la classe des sols à sesquioxydes de fer et les vertisols, on trouve la teneur en argile. Pour la classe des isohumiques, la teneur en Si mobile est corrélée à la teneur en Mg^{2+} .

La relation entre la teneur en si et paramètres de sol n'a mis en exergue qu'un seul modèle dont les paramètres explicatives (pH, Calcaire total et le Mg^{2+}) n'ont pas une relation significative contrairement au Mg^{2+} .

Les résultats auxquels notre étude a parvenu et leur interprétation ainsi que sa portée ouvrent des perspectives intéressantes pour la suite à donner à ce travail. En effet, il serait important de développer l'étude à ce qui suit :

- Elargir la zone d'étude pour contenir d'autres régions du Maroc et donc pouvoir comparer la teneur en silicium sur différentes classes de sol
- Reprendre l'étude avec l'ensemble des fractions du silicium et voir combien le Si mobile représente du Si total du sol

- Effectuer des analyses ultérieures sur les mêmes échantillons de sol en incluant d'autres facteurs qui peuvent agir sur la biodisponibilité du silicium dans le sol, à titre d'exemple les autres éléments minéraux (Al, Fe)

REFERENCES

- Alexandre**, A., Meunier, J.-D., Colin, F., & Koud, J.-M. (1997). Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 61(3), 677–682.
- Ali**, A. (2012). Augmenting the salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) through exogenously applied silicon. *African Journal of Biotechnology*, 11(3), 642–649. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3220>
- Badraoui** M., 2006. Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc, page 93
- Baize** D., et Jabiol (2011), Guide pour la description des sols. INRA Editions, Paris
- Barth** J. G., 2016. Silicium : l'élément longtemps oublié des plantes terrestres.
- Bartoli** F., Souchier B., 1978. Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 35 (3), pp.187-202.
- Beckwith** R.S., et Reeve R., 1963. Studies on soluble silica in soils. The sorption of silicic acid by soils and minerals. 157–168. doi : 10.1071/SR9630157
- Berthelsen** S., et Korndörfer G.H., 2005. Methods for Si analysis in plant, soil and fertilizers, in *Proceedings of the Third Silicon in Agriculture Conference*, 86–93.
- Bouzoubaâ** Z., A. Ait Lhaj, et A. Mimouni, 2009. Le silicium ; le levier minéral indispensable pour une agriculture durable au maroc. Partie 4 : Cultures, itinéraires techniques et productivité. Symposium international « Agriculture durable en région Méditerranéenne (AGDUMED). INRA – CRRA – Agadir, UR Agronomie et qualité. 257 – 265
- Charman**, & B. W. Murphy (Eds.), *Soils: Their properties and management* (2nd ed.). Oxford: Oxford University Press.
- Combeau A., *Technique rural et développement – pédologie et Cours PEDO*, 2012. Les propriétés physiques du sol. Chapitre 5, page 1-54.
- Cornelis** J.T., Ranger J., Iserentant, A., & Delvaux, B. (2010). Tree species impact the terrestrial cycle of silicon through various uptakes. *Biogeochemistry*, 97(2), 231–245. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9369-x>
- Climate** data, 2018. <https://fr.climate-data.org/afrique/maroc/settat/settat-5827/a>
- Delgado** A. et J.A. Gomez, 2016. *Principles of Agronomy for sustainable Agriculture*. Chapitre 2 : the soil physical, chemical and biological properties, page 15.
- Denis** B., 2000. *Guide des analyses en pédologie* 2eme édition revue et augmentée. Edition INRA.
- Djama** N., 2016. Campagne agricole 2015-2016 au Maroc : une chute de 70% de la récolte céréalière attendue. *Journal Usine Nouvelle*. <https://www.usinenouvelle.com/article/campagne-agricole-2015-2016-au-maroc-une-chutede-70-de-la-recolte-cerealiere-attendue.N390942>
- Dr Loïc** Le Ribault., 2014. Silicium et agriculture durable.
- Drees**, L., Wilding, L., Smeck, N., & Sankayi, A. (1989). Silica in soils: quartz and disorders polymorphs. In Dixon JB, Weed SB(eds) *Minerals in soil environments*. Soil Science Society of America Book Series, Madison (pp. 913–974).
- Durant** J H., 1958. Les sols irrigables. Etude pédologique. S.E.S Alger, p198.

- Eldor A. P.** et Francis E. C., (1989). *Soil Microbiology and Biochemistry*, Academic Press; INC. USA, 275 p.
- Epstein E.**, 1994. The anomaly of silicon in plant biology. 11–17. doi: 10.1073/pnas.91.1.11
- Epstein, E.** (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(1), 11–17. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11607449>
- FNM** (Fédération Nationale de la Minoterie) (Maroc), 2012. *Annuaire professionnel des activités céréalières*. Casablanca : FNM.
- Gascho G.J.**, 2001. Silicon in Agriculture, Chapitre 12- Silicon sources for agriculture. Volume 8 (197–207).
- Geeves, G.W.**, Craze, B., Hamilton, G. J. (2000). Soil physical properties. In: P. E. V.
- Hattori, T.**, Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxova, M., & Lux, A. (2005). Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. *Physiologia Plantarum*, 123(4), 459–466. <https://doi.org/10.1111/j.13993054.2005.00481.x>
- Harmsen G.W.** et Kolenbrander G.J. (1965). Soil inorganic nitrogen. In: W.V. Bartholomew, F.E. Clark, eds. *Soil Nitrogen*. Madison, Wis.: American Society of Agronomy, pp. 43–92.
- Hodson, M. J.**, White, P. J., Mead, A., & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96(6), 1027–1046. <https://doi.org/10.1093/aob/mci255> <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011>
- Jones, L. H. P.**, & Handreck, K. A. (1967). Silica in soils, plants, and animals. *Advances in Agronomy*, 19(C), 107–149. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60734-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60734-8)
- Jouve A.M.**, Kheffache Y., Belghazi S., 1995. La filière des céréales dans les pays du Maghreb : constante des enjeux, évolution des politiques. In : Allaya M. (ed.). *Les agricultures maghrébines à l'aube de l'an 2000*. Montpellier : CIHEAM, 1995. p. 169 -192 (Option s Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches ; n .14)
- Journal 2m** - Campagne céréalière 2016-2017 : Bon cru malgré des conditions climatiques défavorables. *Journal 2m*. <http://www.2m.ma/fr/news/campagne-cerealiere-20162017-bon-cru-malgre-un-climat-defavorable-20170918/>
- Kidd, P. S.**, Llugany, M., Poschenrieder, C., Gunse, B., & Barcelo, J. (2001). The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Experimental Botany*, 52(359), 1339–1352. <https://doi.org/10.1093/jxb/52.359.1339>
- Kovda, V.** (1985). *Biogeochemistry of soil cover*. Nauka Publication, Moscow, 159–179. Li, Y. C., Sumner, M. E., Miller, W. P., & Alva, A. K. (1996). Mechanism of silicon induced alleviation of aluminum phytotoxicity. *Journal of Plant Nutrition*, 19(7), 1075–1087. <https://doi.org/10.1080/01904169609365181>
- Liang Y.**, Nikolic M., Bélanger R., Gong H., et Song A., 2015. *Silicon in Agriculture : From Theory to Practice*.
- Liang, Y.**, & Miroslav, N. (2015). *Silicon in Agriculture*. *Studies in Plant Science* (Vol. 8). [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80010-0](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80010-0)
- Liang, Y.**, Sun, W., Zhu, Y. G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147(2), 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Ma, F.**, Tamai, K., Yamaji, N., Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., Yano, M. (2006). A silicon transporter in rice. *Nature*, 440(7084), 688–691. <https://doi.org/10.1038/nature04590>

- Ma, J. F., & Takahashi, E.** (1990). Effect of Silicon on the Growth and Phosphorus Uptake of Rice. *Plant and Soil*, 126(1), 115–119. <https://doi.org/10.1007/BF00041376>
- Ma, J. F., & Takahashi, E.** (2002). *Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan*. Elsevier.
- Ma, J. F., Miyake, Y., & Takahashi, E.** (2001). Silicon as a beneficial element for crop plants. *Studies in Plant Science*, 8(C), 17–39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9)
- Ma, J. F., Yamaji, N., & Mitani-Ueno, N.** (2011). Transport of silicon from roots to panicles in plants. *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences*, 87(7), 377–385. <https://doi.org/10.2183/pjab.87.377>
- Ma, J. F., and Yamaji, N.** (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci.* 11, 392–397. doi: 10.1016/j.tplants.2006.06.007
- Ma, J. F., Yamaji, N., Mitani, N., Tamai, K., Konishi, S., Fujiwara, T., Yano, M.** (2007). An efflux transporter of silicon in rice. *Nature*, 448(7150), 209–212. <https://doi.org/10.1038/nature05964>
- Mali, M., & Aery, N. C.** (2008a). Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, 31(11), 1867–1876. <https://doi.org/10.1080/01904160802402666>
- MAMPDREF – DSS**, 2016. Note de veille céréales. Note stratégique N°106. Ministère de l’agriculture et de la pêche maritime – Direction de la Stratégie et des statistiques.
- MAMPDREF - DSS**, 2018. Agriculture en chiffre 2017. Ministère de l’agriculture et de la pêche maritime – Direction de la Stratégie et des statistiques.
- MAMPM**, 2018. Campagne céréalière 2017-2018 : rendement moyen record historique. *Journal fellah trade*. <https://www.fellah-trade.com/fr/actualites-maroc/article/13811,campagne-cerealieres-2017-2018-rendement-moyen-record-historique>
- Marafon A.C., et Endres L.**, 2013. Silicon: fertilization and nutrition in higher plants, 380– 388. doi: 10.4322/rca.2013.057
- McGinnity, P.** (2015). *Silicon and Its Role in Crop Production*, 27.
- Meena V.D., Dotaniya M.L., Vassanda C., Rajendiran S., Kundu A.S., et Rao A.S**, 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils, 505–518. doi: 10.1007/s40011-013-0270y
- Mengel K. et Kirby E. A.**, 1982. *Principles of Plant Nutrition*. International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Meunier, J. D., & Colin, F.** (2001). *Phytoliths : applications in earth sciences and human history*. A.A. Balkema Publishers.
- Miao, B. H., Han, X. G., & Zhang, W. H.** (2010). The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium deficient medium. *Annals of Botany*, 105(6), 967–973. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq063>
- Mitani, N., Chiba, Y., Yamaji, N., & Ma, J. F.** (2009). Identification and Characterization of Maize and Barley Lsi2-Like Silicon Efflux Transporters Reveals a Distinct Silicon Uptake System from That in Rice. *The Plant Cell Online*, 21(7), 2133–2142. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.067884>
- Mitani, N., Yamaji, N., Ago, Y., Iwasaki, K., & Ma, J. F.** (2011). Isolation and functional characterization of an influx silicon transporter in two pumpkin cultivars contrasting in silicon accumulation. *Plant Journal*, 66(2), 231–240. <https://doi.org/10.1111/j.1365313X.2011.04483.x>
- Monographie agricole de la région de Casablanca-Settat, 2018. Ministère de l’agriculture, de la pêche maritime, du développement rural et des eaux et forêts - direction régionale de l’agriculture région Casablanca Settat

- Montori J.P.** (1996). Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol Etude et Gestion des sols. Centre ORSTOM. France. pp. 279-298.
- Nouijai A.**, Y. Courbage, EL.H. El mansouri, A. Morsi, S. Chahoua, A. Abouhani, N. Harrami, A. Chaouai, et S. Bouzafour, 2011. Dynamique urbaine et développement rural au Maroc, Chapitre 7 - Evolution du secteur agricole et perspectives de développement rural. Ministère de la prévision économique et du plan- centre d'études et de recherches démographiques.
- Parent S.**, 2018. Le rôle du silicium en horticulture. <https://www.pthorticulture.com/fr/zone-du-savoir/le-role-du-silicium-en-horticulture/>
- Pei, Z. F.**, Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J., & Zhou, W. J. (2010). Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 29(1), 106– 115. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>
- Richmond, K. E.**, & Sussman, M. (2003). Got silicon The non-essential beneficial plant nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(3), 268–272. [https://doi.org/10.1016/S13695266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S13695266(03)00041-4)
- Rogalla, H.**, & Romheld, V. (2002). Role of leaf apoplast in silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant, Cell and Environment*, 25(4), 549–555. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00835.x>
- Sauer D.**, Saccone L., Conley D.J., Herrmann L., and Sommer M., 2006. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments, 89–108. doi: 10.1007/s10533-005-5879-3
- Savant N.K.**, Datnoff L.E., et Snyder G.H., 1997. Depletion of plant-available silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. 1245–1252.
- Savant, N. K.**, Korndorfer, G. H., Datnoff, L. E., & Snyder, G. H. (1999). Silicon nutrition and sugarcane production: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 22(12), 1853–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>
- Schaffer R.**, 1975, La matière organique du sol 1=er séminaire sur la croissance des sols du Maghreb, Institut National Agronomique El Harach. (Alger). Avril 1975.
- Segalen P.**, 1970. Techniques rurales en Afrique, pédologie et développement. Chapitre 4, page 115. Secrétariat d'étude aux affaires étrangères
- Shen, X.**, Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., & Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*, 167(15), 1248–1252.
- Snyder G.H.**, 2001. Methods of silicon analysis in plants, soils, and fertilizers, in *Silicon in Agriculture*, 185–196.
- Sommer, M.**, Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., & Breuer, J. (2006). Silicon pools and fluxes in soils and landscapes - A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(3), 310– 329. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>
- Steiner R.**, 1999. Cours aux agriculteurs (GA 327). Editions Triades, Laboissière-en-Thelle.
- Tahhar A.**, 2015. Organisation de la chaîne logistique dans la filière céréales au Maroc, état des lieux et perspectives. Master of science.
- Tahir M. A.**, T. Aziz, A. Ashraf, S. Kanwal, et M. A. Maqsood, 2006. Beneficial Effects of Silicon in Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Under Salinity Stress. *Pakistan Journal of Botany* 38 : 1715 – 1722

- Takahashi, E., Ma, J. F., & Miyake, Y.** (1988). The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Comments on Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 2). Gordon and Breach, Science Publishers. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19921964619>
- Tali K.,** 2018. Céréales : Un rendement en constante amélioration. *Journal Aujourd'hui*, <http://aujourd'hui.ma/economie/cereales-un-rendement-en-constante-amelioration>
- Tibbitts, Spencer A.,** 2018. Effect of Silicon on Wheat Growth and Development in Drought and Salinity Stress. Master of science in Plant Science (Crop Physiology). Utah State University. Logan, Utah.
- Tubana B.S., Babu, T., et Datnoff, L. E.,** 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture : history and future perspectives. 393–411. doi :10.1097/SS.0000000000000179
- Van Cappellen, P.** (2003). Biomineralization and Global Biogeochemical Cycles. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54(1), 357–381. <https://doi.org/10.2113/0540357>
- Walgraffe Y.,** 2017. Influence de la biodisponibilité du silicium dans le sol sur les defenses naturelles des plantes contre les bioagresseurs. Université de Liège – Gembloux Agro-bio Tech
- Wedepohl H.K.,** 1995. The composition of the continental crust. *Geoschemisches Institut*, D370177 Göttingen, Germany. doi :10.1016/0016-7037(95)00038-2
- Wedepohl, K. H.** (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- White W.H., et White P.M.,** 2013. Sugarcane borer resistance in sugarcane as affected by silicon applications in potting medium. 38–54.
- Yoshida, S., Navasero, S. A., & Ramirez, E. A.** (1969). Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characters of the rice plant. *Plant and Soil*, 31(1), 48–56. <https://doi.org/10.1007/BF01373025>

Annexe 1 : Liste de l'ensemble des sols des deux régions

Tableau 1 : Classification des sols de Settat

CLASSE	Sous-classe	GROUPE	Sous-groupe	Famille
Sols Minéraux Bruts	Non climatiques	D'érosion	Lithosols	Schistes gréseux à quartzitiques
				Calcaires durs
Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'érosion	Régosoliques	Argiles rouges
				Calcaires à schistes et/ou à quartzitiques
				Formations à sables et/ou calcaires siliceux
		D'apport	Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques
				Schistes gréseux à quartzitiques
				Formations à sables et/ou calcaires siliceux
Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques
			Vertiques	Formations superficielles limoneuses rouges
				Formations superficielles limoneuses rouges
Calcimagnésiques	Sols carbonatés	Rendzines	Modaux	Marno-calcaire
			Riche calcaire actif	Conglomérats mio-pliocène
				Marno-calcaire
				Marno-calcaire
			Pauvre calcaire actif	Calcaires gréseux encroutés
		--	Calcaires à schistes et/ou à quartzitiques	
	Brun calcaire	Formations superficielles limoneuses lim. rouge	Formations superficielles limoneuses rouges	
		Marno_calcaire	Marno-calcaire	
Sols saturés	Brun calciques mélangés	Formations superficielles limoneuses lim. rouge	Formations superficielles limoneuses rouges	
Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Modaux	Argiles rouges
				Calcaires à schistes et/ou quartzites
				Calcaires à schistes et/ou quartzites
				Formations superficielles rouges
				Formations superficielles rouges
			Encroûtée	Formations superficielles rouges

			Vertiques	Schistes gréseux à quartzitiques
			Encroûtée et vertique	Formations superficielles limoneuses rouges
			Encroûtée et vertique	Formations superficielles limoneuses rouges
			rouge	Calcaires a schistes et/ou quartzites
		rouge	Formations à calcaires siliceux	
		Sols bruns subtropicaux	Encroûtée	Argiles rouges
				Formations à calcaires siliceux
			Vertiques	Formations superficielles limoneuses rouges
Brunifères	Climats tempérés	Bruns lessives	Faiblement lessive	Schistes gréseux à quartzitiques
			bruns lessive	Schistes gréseux à quartzitiques
			Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques
			paleohydromorphe	Schistes gréseux à quartzitiques
Sesquioxides de Fer	Fersialitiques	A réserve calcique	Modaux	Format. Sable et/ou calcaires silicieux
				Format. Sable et/ou calcaires silicieux
				Conglomérats mio-pliocene
				Formations superficielles limoneuses rouges
			A caractère vertique	Conglomérats mio-pliocene
				Schistes gréseux à quartzitiques
Complexe				

Tableau 2 : Classification des sols de Meknès

CLASSE	Sous-Classe	GROUPE	Sous-groupe	FAMILLE
A Sesquioxides de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	A réserve calcique	Modal	Limons calcaires α galets, encroutement et grès calcaires
			Modal	Calcaire lacustre
			Recarbonate	Limons calcaires
				Encroutement calcaires
			Vertiques	Colluvions α galets calcaires
				Calcaire lacustre
Lessives	Sables et grès rubéfiés			
Calcimagnésiques	Carbonates	Brun calcaire	A croute en encroutement	Calcaires lacustres durs

				Encrouement et limons calcaires, grés et sables calcaires
			Modal	Formations calcaires α facies variable
			Vertiques	Encrouement et limons calcaires
				Calcaires lacustres
		Rendzine	Peu Humifère	Formations calcaires α facies variable
Complexe	Complexe	Complexe	Complexe	Complexe
Isohumiques	A pédo-climat frais pendant une saison de l'année	Bruns	Vertiques	Formations calcaires α facies variable
		Marrons	Modaux	Limons calcaires encroutés
			Calcaires lacustres, grès calcaires	
Marrons	Vertiques	Formations calcaires α facies variable		
Sols Minéraux Bruts	Non climatiques	D'érosion	Lithosols	Calcaires durs du Jurassique
				Marnes du tortonien
				Argiles du trias
Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Hydromorphe	Argiles jaunâtres
				Colluvions Rubéfiés
			Modaux	Colluvions et sables rubéfiés
				Colluvions sur grès rubéfiés
				Argiles jaunâtres
				Croute calcaire
		Vertiques	Colluvions calcaires sur lits de galets	
			Colluvions sur marnes du Tortonien	
		D'apport alluvial	A caractère salin	Argiles salifères du Trias
			Hydromorphe	Alluvions anciennes sur argiles salifères du Trias
			Modaux	Alluvions anciennes sur marnes du Tortonien
			Vertiques	Alluvions calcaires anciennes
		D'érosion	Lithosoliques	Calcaires durs du Jurassique, Calcaire lacustre
Regosoliques	Marnes du tortonien			
Regosoliques	Argiles du Trias, Sable greseux			
Urbain	Urbain	Urbain	Urbain	Urbain
Vertisols	A drainage externe possible	A structure Anguleuse	Modaux	Colluvions calcaires
			Vertiques	Marnes du tortonien
				Limons calcaires

		A structure arrondie	Modaux	Marnes du tortonien
				Limons calcaires
			Vertiques	Encroutement calcaires et limon calcaire
				Colluvions calcaires et blocs
				Marnes du tortonien
	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Hydromorphe	Marnes du tortonien
			Modaux	Colluvions calcaires
				Limons calcaires
				Marnes du tortonien
			Vertiques	Colluvions calcaires
Argiles jaunâtres				
Limons calcaires				

Annexe 2 : Le choix des sols sur chaque région

Tableau 3 : les sols choisis pour la région de Settat

Code	Superficie (ha)	Classe	Sous-Classe	GROUPE	Sous-groupe	Famille
	6974,92	Sols Minéraux Bruts	Non climatiques	D'érosion	Lithosols	Schistes gréseux à quartzitiques
	11748,29	Sols Minéraux Bruts	Non climatiques	D'érosion	Lithosols	Calcaires durs
	2344,82	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'érosion	Régosoliques	Argiles rouges
	470,34	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'érosion	Régosoliques	Calcaires à schistes et/ou à quartzitiques
	5460,79	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'érosion	Régosoliques	Formations à sables et/ou calcaires siliceux
	790,05	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'apport	Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques
	1117,17	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'apport	Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques
	507,92	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'apport	Modaux	Formations à sables et/ou calcaires siliceux
V1	3858,05	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques
V2	7579,83	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Modaux	Formations superficielles limoneuses rouges
V2	3505,66	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Vertiques	Formations superficielles limoneuses rouges
C1	22589,1	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Rendzines	Modaux	Marno-calcaire
	1494,13	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Rendzines	Riche calcaire actif	Conglomérats mio-pliocene
C1	28829,56	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Rendzines	Riche calcaire actif	Marno-calcaire
C1	13760,35	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Rendzines	Riche calcaire actif	Marno-calcaire
C2	3267,77	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Rendzines	Pauvre calcaire actif	Calcaires gréseux encroutés
C2	2447,2	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Rendzines		Calcaires à schistes et/ou à quartzitiques
C3	10628,46	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Brun calcaire	Formations superficielles limoneuses rouge	Formations superficielles limoneuses rouges

C3	36429,57	Calcimagnésiques	Sols carbonates	Brun calcaire	Marno_calcaire	Marno-calcaire
	4116,77	Calcimagnésiques	Sols satures	Brun calciques mélangés	Formations superficielles limoneuses rouge	Formations superficielles limoneuses rouges
I1	1463,34	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Modaux	Argiles rouges
I1	362,72	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Modaux	Calcaires a schistes et/ou quartzites
I1	1680,49	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Modaux	Calcaires a schistes et/ou quartzites
I1	1779,42	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Modaux	Formations superficielles rouges
I1	2794,33	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Modaux	Formations superficielles rouges
I2	4734,18	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Encroûtée	Formations superficielles rouges
	894,11	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Vertiques	Schistes gréseux à quartzitiques
I2	7384,22	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Encroûtée et vertique	Formations superficielles limoneuses rouges
I2	3415,24	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	Encroûtée et vertique	Formations superficielles limoneuses rouges
	829,9	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	rouge	Calcaires a schistes et/ou quartzites
	509,81	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Châtains	rouge	Formations à calcaires siliceux
I3	297,17	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Sols bruns subtropicaux	Encroûtée	Argiles rouges
I3	3425,33	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Sols bruns subtropicaux	Encroûtée	Formations à calcaires siliceux
I3	4755,98	Isohumiques	Pédoclimat frais en saison pluvieuses	Sols bruns subtropicaux	Vertiques	Formations superficielles limoneuses rouges
	420,25	Brunifiés	Climats tempérés	Bruns lessives	Faiblement lessive	Schistes gréseux à quartzitiques
	1527,71	Brunifiés	Climats tempérés	Bruns lessives	bruns lessive	Schistes gréseux à quartzitiques
	224,49	Brunifiés	Climats tempérés	Bruns lessives	Modaux	Schistes gréseux à quartzitiques
	254,92	Brunifiés	Climats tempérés	Bruns lessives	paleohydromorphe	Schistes gréseux à quartzitiques
F1	7131,32	Sesquioxydes de Fer	Fersialitiques	A réserve calcique	Modaux	Format. Sable et/ou

						calcaires silicieux
	1948,34	Sesquioxydes de Fer	Fersialitiques	A réserve calcique	Modaux	Format. Sable et/ou calcaires silicieux
	153,59	Sesquioxydes de Fer	Fersialitiques	A réserve calcique	Modaux	Conglomérats mio-pliocene
	65,12	Sesquioxydes de Fer	Fersialitiques	A réserve calcique	Modaux	Formations superficielles limoneuses rouges
	153,91	Sesquioxydes de Fer	Fersialitiques	Sans reserve calcique	A caractere vertique	Conglomérats mio-pliocene
	69,98	Sesquioxydes de Fer	Fersialitiques	Sans reserve calcique	A caractere vertique	Schistes gréseux à quartzitiques
		Complexe				

Tableau 4 : les sols choisis pour la région de Meknès

	Sup.	Classe	Sous-Classe	Groupe	Sous-gr.	Famille
F1	6342337	Sesquioxydes de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	A réserve calcique	Modal	Limons calcaires α galets, encroutement et grès calcaires
F1	45596689	Sesquioxydes de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	A réserve calcique	Modal	Calcaire lacustre
	2076735	Sesquioxydes de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	A réserve calcique	Recarbonate	Limons calcaires
	1758921	Sesquioxydes de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	A réserve calcique	Recarbonate	Encroutement calcaires
	9838939	Sesquioxydes de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	A réserve calcique	Vertiques	Colluvions α galets calcaires
	1875345	Sesquioxydes de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	A réserve calcique	Vertiques	Calcaire lacustre
	40187236	Sesquioxydes de Fer et de Manganèse	Fersialitiques	Sans réserve calcique	Lessives	Sables et grès rubéfiés
	11416250	Calcimagnésiques	Carbonates	Brun calcaire	A croute en encroutement	Calcaires lacustres durs
C1	52866117	Calcimagnésiques	Carbonates	Brun calcaire	A croute en encroutement	Encroutement et limons calcaires, grès et sables calcaires
C2	88809968	Calcimagnésiques	Carbonates	Brun calcaire	Modal	Formations calcaires α facies variable
	24927197	Calcimagnésiques	Carbonates	Brun calcaire	Vertiques	Encroutement et limons calcaires
	2236257	Calcimagnésiques	Carbonates	Brun calcaire	Vertiques	Calcaires lacustres
	102082650	Calcimagnésiques	Carbonates	Rendzine	Peu Humifère	Formations calcaires α facies variable

	2251751	Complexe	Complexe	Complexe	Complexe	Complexe
I1	2478479	Isohumiques	A pédo-climat frais pendant une saison de l'année	Bruns	Vertiques	Formations calcaires α facies variable
I1	4047291	Isohumiques	A pédo-climat frais pendant une saison de l'année	Marrons	Modaux	Limons calcaires encroutés
I1	2138139	Isohumiques	A pédo-climat frais pendant une saison de l'année	Marrons	Modaux	Calcaires lacustres, grès calcaires
I1	17306614	Isohumiques	A pédo-climat frais pendant une saison de l'année	Marrons	Vertiques	Formations calcaires α facies variable
	95515893	Sols Minéraux Bruts	Non climatiques	D'érosion	Lithosols	Calcaires durs du Jurassique
	17011059	Sols Minéraux Bruts	Non climatiques	D'érosion	Regosols	Marnes du tortonien
	2116219	Sols Minéraux Bruts	Non climatiques	D'érosion	Regosols	Argiles du trias
	3367474	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Hydromorphe	Argiles jaunâtres
	966351	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Hydromorphe	Colluvions Rubéfiés
	4481736	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Modaux	Colluvions et sables rubéfiés
	2339121	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Modaux	Colluvions sur grès rubéfiés
	4293911	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Modaux	Argiles jaunâtres
	243060	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Modaux	Croute calcaire
	40810568	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Vertiques	Colluvions calcaires sur lits de galets
	10954140	Sols Peu Evolues	Non climatiques	Apport colluvial	Vertiques	Colluvions sur marnes du Tortonien
	1739406	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'apport alluvial	A caractère salin	Argiles salifères du Trias
	498618	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'apport alluvial	Hydromorphe	Alluvions anciennes sur argiles salifères du Trias
	5953021	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'apport alluvial	Modaux	Alluvions anciennes sur marnes du Tortonien
	74387308	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'apport alluvial	Vertiques	Alluvions calcaires anciennes
	60281439	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'érosion	Lithosoliques	Calcaires durs du Jurassique, Calcaire lacustre
	182900498	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'érosion	Regosoliques	Marnes du tortonien
	4755071	Sols Peu Evolues	Non climatiques	D'érosion	Regosoliques	Argiles du Trias, Sable gréseux
	80705337	Urbain	Urbain	Urbain	Urbain	Urbain
	2699509	Vertisols	A drainage externe possible	A structure Anguleuse	Modaux	Colluvions calcaires

V1	10625650	Vertisols	A drainage externe possible	A structure Anguleuse	Vertiques	Marnes du tortonien
	7030618	Vertisols	A drainage externe possible	A structure Anguleuse	Vertiques	Limons calcaires
	7347566	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Modaux	Marnes du tortonien
	2076191	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Modaux	Limons calcaires
V2	32775200	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Vertiques	Encroutement calcaires et limon calcaire
	3616412	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Vertiques	Colluvions calcaires et blocs
V1	92980417	Vertisols	A drainage externe possible	A structure arrondie	Vertiques	Marnes du tortonien
	646351	Vertisols	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Hydromorphe	Marnes du tortonien
	7133979	Vertisols	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Modaux	Colluvions calcaires
	2340277	Vertisols	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Modaux	Limons calcaires
V1	18673443	Vertisols	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Modaux	Marnes du tortonien
	4447969	Vertisols	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Vertiques	Colluvions calcaires
	2260899	Vertisols	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Vertiques	Argiles jaunâtres
V2	12141626	Vertisols	A drainage externe réduit	A structure arrondie	Vertiques	Limons calcaires

Annexe 3 : Test de Duncan

Pour procéder au calcul du test de Duncan, les moyennes des classes ont été placées par ordre décroissant comme ci-dessous :

Classes de sol	C	I	V	S
Moyenne	22,17	15,04	11,66	10,71

Pour comparer les 4 moyennes de cet exemple, on a calculé la valeur des écarts pour une gamme de 4, 3 et 2 moyennes avec l'équation suivante :

$$\text{Écart} = Q \times \sqrt{\frac{\text{CM(Er)}}{t}}$$

La valeur de CM(Er), qui provient du tableau d'Analyse de variance de calcaire totale (Tableau 3), était de 3,86.

Le t correspond au nombre de réponses ayant servi à calculer chaque moyenne ; dans cet exemple, t = 4. Écart = Q x 0,98

On a obtenu les valeurs de Q à partir de la table de Duncan pour le même niveau de signification qu'on a utilisé dans l'analyse de variance soit $\alpha = 0,05$. On a aussi besoin de dl(E), soit de 3, pour calculer les valeurs de Q.

Valeur de Q pour 4 moyennes = 4,516 ; valeur de Q pour 3 moyennes = 4,516 et valeur de Q pour 2 moyennes = 4,501

On a pu alors calculer la valeur des écarts :

- Écart pour 4 moyennes = 4,44,
- Écart pour 3 moyennes = 4,44
- Écart pour 2 moyennes = 4,42

On a appliqué la valeur de l'écart des quatre moyennes aux moyennes ayant les plus grandes différences entre elles (C) 22,17 et (V) 10,71, puisque ces valeurs couvrent l'écart des 4 moyennes. La différence 4-1 était supérieure à 4,44. La différence entre ces deux moyennes était donc significative.

La comparaison sur trois moyennes a porté sur les moyennes (C) 22,17 et (V) 11,66.

$$22,17 - 11,66 = 10,52 > 4,44$$

La comparaison sur deux moyennes a porté sur les moyennes (C) 22,17 et (I) 15,04

$$22,17 - 15,04 = 7,13 > 4,42$$

La moyenne suivante la plus élevée a ensuite été comparée avec la moyenne la plus faible et la différence a été comparée à la valeur de l'écart pour les 3 moyennes.

$$(I) - (S) 15,04 - 10,71 = 4,34 < 4,44$$

On a procédé de la façon indiquée ci-dessus jusqu'à ce qu'on ait fait les comparaisons entre toutes les moyennes.

$$(I) - (V) 15,04 - 11,66 = 3,39 < 4,42$$

$$(V) - (S) 11,66 - 10,71 = 0,95 < 4,42$$



la classe des sols calcimagnésique diffère significativement par rapport aux autres classes.

Annexe 4 : Matrice de corrélation

- Pour l'ensemble des échantillons

Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des sols étudiés

		Si	pH	CE	CaCO3	MO	Sable	Limon	Argile	Na	K	Mg	Ca	CEC
Si	Corrélation de Pearson	1	-	-,188	-,327*	,136	-,078	-,022	,113	-	-,065	,541**	-,142	,086
	Sig.		,409**	,251	,042	,410	,636	,895	,495	,238	,696	,000	,387	,604
pH	Corrélation de Pearson	-,409**	1	,672**	,468**	,031	,044	-,072	,036	,382*	,058	-	,446**	,192
	Sig.	,010		,000	,003	,853	,790	,662	,826	,016	,727	,533**	,004	,241
CE	Corrélation de Pearson	-,188	,672**	1	,397*	-,054	,138	-,073	-,097	,082	,129	-	,392*	,148
	Sig.	,251	,000		,012	,743	,403	,661	,557	,619	,435	,480**	,013	,370
CaCO3	Corrélation de Pearson	-,327*	,468**	,397*	1	,284	-,256	,224	,102	,170	,212	-	,777**	,494**
	Sig.	,042	,003	,012		,080	,115	,171	,539	,300	,195	,591**	,000	,001
MO	Corrélation de Pearson	,136	,031	-,054	,284	1	-,076	-,097	,134	-	,031	,263	,669**	,905**
	Sig.	,410	,853	,743	,080		,645	,558	,417	,010	,850	,106	,000	,000
Sable	Corrélation de Pearson	-,078	,044	,138	-,256	-,076	1	-,598**	-,698**	,147	,073	-,030	-,122	-,118
	Sig.	,636	,790	,403	,115	,645		,000	,000	,373	,661	,857	,458	,474
Limon	Corrélation de Pearson	-,022	-,072	-,073	,224	-,097	-	1	-,148	-	-,189	,014	,014	-,022
	Sig.	,895	,662	,661	,171	,558	,598**		,369	,223	,249	,934	,934	,893
Argile	Corrélation de Pearson	,113	,036	-,097	,102	,134	-	-,148	1	,044	,074	,005	,116	,127
	Sig.	,495	,826	,557	,539	,417	,698**	,369		,789	,653	,976	,482	,440

Na	Corrélation de Pearson Sig.	-,238 ,144	,382* ,016	,082 ,619	,170 ,300	-,010 ,953	,147 ,373	-,223 ,173	,044 ,789	1	,234 ,151	-,260 ,109	,122 ,459	,081 ,624
K	Corrélation de Pearson Sig.	-,065 ,696	,058 ,727	,129 ,435	,212 ,195	,031 ,850	,073 ,661	-,189 ,249	,074 ,653	,234 ,151	1	-,382* ,016	,164 ,318	,080 ,630
Mg	Corrélation de Pearson Sig.	,541** ,000	- ,533** ,000	- ,480** ,002	-,591** ,000	,263 ,106	-,030 ,857	,014 ,934	,005 ,976	- ,260 ,109	- ,382* ,016	1	- ,360* ,024	,111 ,500
Ca	Corrélation de Pearson Sig.	-,142 ,387	,446** ,004	,392* ,013	,777** ,000	,669** ,000	-,122 ,458	,014 ,934	,116 ,482	,122 ,459	,164 ,318	-,360* ,024	1	,847** ,000
CEC	Corrélation de Pearson Sig.	,086 ,604	,192 ,241	,148 ,370	,494** ,001	,905** ,000	-,118 ,474	-,022 ,893	,127 ,440	,081 ,624	,080 ,630	,111 ,500	,847** ,000	1