



**PROJET DE FIN D'ÉTUDES**  
**PRESENTÉ EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES**  
**GESTION ET CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE**

**Evaluation de la mobilité de quelques oligo-éléments  
(Mn, Zn, Cu, Fe, et B) dans le sol argileux-calcaire de  
Séfrou**

**Présenté par : LYOUSFI Nadia**

**Encadré par : Pr. EL GHADRAOUI Lahsen (FST Fes)**

**Mr. AMLAL Fouad (Providence verte)**

**Pr. DRISSI Saad (ENA Méknes)**

**Soutenu le : 12 juin 2018, devant le jury composé de :**

**- Pr. ERRACHIDI Faouzi (FST Fes)**

**- Pr. LAZRAQ Abderrahim (FST Fes)**

**- Pr. MIKOU Karima (FST Fes)**

**Année Universitaire : 2017/2018**

# **Dédicaces**

*Je dédie ce travail*

*À mes très chers parents : LYOUSFI Mohammed et MASDOUR Khira : Votre prière et votre bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance.*

*C'est avec beaucoup de fierté que je vous dédie ce travail, et qui n'est en réalité que le fruit de vos efforts, en témoignage de mon profond amour. Puisse DIEU vous protéger et procurer bonne santé et longue vie.*

*À mes chers frères : Sayf Eddine et Soufiane*

*À toute ma famille*

*À tous ceux qui me sont chers*

*À tous ceux qui comptent pour moi*

*À mes chères amies*

## REMERCIEMENTS

Le présent mémoire est le fruit de la collaboration entre la providence verte et la faculté des sciences et technique Fès. Cette étude couronne mes études du Master à la faculté des sciences et techniques Fès.

Au terme de ce travail, je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la santé, la puissance et la patience pour réaliser ce travail.

Ma profonde gratitude et mes vifs remerciements sont adressés à Mr EL GHADRAOUI Lahsen, professeur à la FST FES, pour son encadrement, ses précieux conseils, ses importantes directives ainsi que pour sa sympathie et sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens à présenter mes sincères reconnaissances au professeur AIT HOUSSA Abdelhadi, directeur des Providences Vertes, et à Monsieur EL HADRI Karim, qui m'ont autorisé de mener à bien mon projet de fin d'étude au domaine Louata, bénéficiant ainsi des compétences et du savoir de l'équipe technique et administratif, même, des matériels disponibles.

Je tiens à remercier également Mr. AMLAL Fouad, responsable de la production arboricole à Louata, qui m'a consacré beaucoup de temps malgré ses multiples préoccupations. Je le remercie pour son soutien technique et son encadrement durant toute la période nécessaire pour la réalisation de cette étude et pour l'exploitation des résultats obtenus, plus particulièrement ses remarques pointilleuses et son souci constant à aboutir un travail de recherche de qualité.

Je tiens à remercier Dr. DRISSI Saad, professeur à l'Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès, pour son encadrement indéfectible, son soutien et son bienveillance tout au long de la réalisation de ce travail. Ses conseils fructueux, sa disponibilité, ses qualités scientifiques et humaines ont énormément contribué à la réalisation de cette étude.

Je remercie également Dr. ASFERS Adil, directeur du Centre de Recherche et de Formations Louata. Je remercie très spécialement Mr. ER-REZZA Hamid pour son soutien incessant, ses conseils précieux, durant la réalisation de ce travail.

Je remercie également Mme ZARZAR Rania, Mr. BENSAID Atmane, Mr. DHASSI Khalid, Mr. LBYAD, et Mr. LMGHARI pour leur aide pendant la période du stage.

Un grand merci aux honorables membres du jury qui ont bien voulu juger mon Projet de Fin d'Études en m'aidant à le parfaire.

Mes vifs remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences et Techniques FES et en particulier ceux de la filière Gestion et Conservation de la Biodiversité pour l'effort qu'ils ont déployé afin d'assurer notre formation.

Enfin je suis redevable à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## **RESUME**

La réduction des effets secondaires des fertilisants sur l'environnement est un enjeu majeur du grenelle de l'environnement. L'utilisation prolongée des micro-éléments comme fertilisants a entraîné des perturbations au niveau du sol et de la nappe phréatique.

Nous avons cherché à évaluer l'effet des doses de lessivage sur la mobilité de cinq oligoéléments ; le Fer (Fe), le Cuivre (Cu), le Manganèse (Mn) et le Bore (B), le Zinc (Zn) appliqués comme engrais, au niveau du sol argileux-calcaire de la province de Ségrou.

Pour cela l'étude a été menée dans deux expérimentations ; la première au niveau des colonnes en PVC remplies à une hauteur de 30 cm. Un apport de 1.2 mg.kg<sup>-1</sup> de Fe, 5 mg.kg<sup>-1</sup> de Mn, 0.6 mg.kg<sup>-1</sup> de Cu, et 0.5 mg.kg<sup>-1</sup> de B est appliqué à la surface du sol en tant que solution. Le Bore, le Cuivre ont été apporté séparément et puis en mélange avec le Zinc, le Fer, et le Manganèse. Nous avons exposé ces oligo-éléments à trois doses de lessivage 35mm, 70mm, et 140mm. Enfin nous avons évalué les pertes en lessivage de chaque élément. La deuxième expérimentation a été conduite dans des lysimètres au champ, les cinq oligo-éléments ont été apportés en mélange, puis exposé aux conditions climatique et l'irrigation, ensuite nous avons mesuré la distribution de chaque élément étudié au niveau du profil du sol dans les deux expérimentations. Le dispositif expérimental adopté est en blocs aléatoires complets avec quatre répétitions. Des analyses chimiques de lixiviat et du sol ont été effectués pour évaluer la mobilité de différents éléments minéraux après lessivage.

Les résultats ont montré que le B est mobile, dont une quantité importante a été trouvée dans le lixiviat. En revanche, le Cu, et le Zn ne sont pas mobile et se sont localisés au niveau du premier horizon (0-10 cm) pour toutes les doses de lessivage apportées, pour le Mn, et le Fe sont considérés moins mobiles que le bore. Pour l'expérimentation au niveau des lysimètres, le Cu, Fe, Zn et le Mn sont considérés moins mobiles dans le sol, pour les pertes en lessivage des oligo-éléments les résultats sont encore au cours de réalisation.

**Mots clés :** Oligo-éléments ; Cuivre ; Manganèse ; Fer ; Zinc ; Bore ; Lessivage ; Fertilisation ; Mobilité ; Sol argileux-calcaire ; Lysimètre.

## **Abstract**

The reduction of the side effects of fertilizers on the environment is a major stake of the Grenelle of the environment. The prolonged use of micronutrients as fertilizers has led to disturbances in the soil and groundwater.

We sought to evaluate the effect of leaching doses on the mobility of five micronutrients; iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn) and boron (B), Zinc applied as fertilizer, in the clay-limestone soil of the province of Sefrou.

For this the study was conducted in two experiments; the first at the level of PVC columns filled to a height of 30 cm. An intake of 1.2 mg.kg<sup>-1</sup> Fe, 5 mg.kg<sup>-1</sup> Mn, 0.6 mg.kg<sup>-1</sup> Cu, and 0.5 mg.kg<sup>-1</sup> B is applied to the soil surface as a solution. Boron, copper were brought separately and then mixed with Zinc, Iron, and Manganese. We exposed these micronutrients to three leaching doses 35mm, 70mm, and 140mm. Finally we evaluated the leaching losses of each element. The second experiment was in lysimeters in the field, the five trace elements were brought in mixture, and then exposed to climatic conditions and irrigation, and then we measured the distribution of each element studied at the level of the soil profile in both experiments. The experimental design adopted is in complete random blocks with four repetitions. Chemical analyzes of leachate and soils were performed to evaluate the mobility of different mineral elements after leaching.

The results showed that B is mobile, a significant amount of which has been found in leachate. On the other hand, the Cu, and the Zn are not mobile and are located at the level of the first horizon (0-10 cm) for all the leaching doses made, for the Mn, and the Fe they are considered less mobile than the boron. For experimentation at the level of the lysimeters, Cu, Fe, Zn and Mn are considered less mobile in the soil, for leaching losses of trace elements the results are still running.

**Key words:** Trace elements ; Copper; Manganese; Iron ; Zinc; Boron; Leaching; Fertilization; Mobility; Clay-limestone soil; Lysimeter.

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : Symptômes de carences en oligo-éléments .....  | 6  |
| Tableau 2 : Teneurs critiques en oligo-éléments dans les plantes et dans les sols .....                                  | 7  |
| Tableau 3 : Teneurs totales et échangeable des oligoéléments dans le sol .....   | 8  |
| Tableau 4 : Teneurs en oligo-éléments dans les roches et le sol .....  | 8  |
| Tableau 5 : Synthèse des différentes concentrations ubiquitaires du cuivre dans les fonds géochimiques .....             | 10 |
| Tableau 6 : Principales propriétés physico-chimiques du cuivre aux conditions de pression et température ordinaires..... | 10 |
| Tableau 7 : Effet du pH sur la mobilité des oligo-éléments dans le sol .....   | 19 |
| Tableau 8 : Effets du potentiel redox sur la mobilité des oligoéléments dans le sol .....                                | 23 |
| Tableau 9 : Classification granulométrique de Wentworth .....  | 24 |
| Tableau 10 : Méthodes d'extraction ménagée des éléments en trace du sol normalisées à la normalisation en Europe.....    | 29 |
| Tableau 11 : Normes d'interprétations d'analyse du sol .....   | 30 |
| Tableau 12 : Composition granulométrique du sol étudié .....   | 36 |
| Tableau 13 : Caractéristiques chimique du sol étudié .....   | 36 |
| Tableau 14 : Forme et quantité apportée d'oligo-éléments.....  | 39 |
| Tableau 15 : Doses de lessivage appliqué.....  | 39 |
| Tableau 16 : Forme et quantités apporté des oligo-éléments .....   | 43 |
| Tableau 17 : Composition granulométrique des sols .....  | 45 |
| Tableau 19 : pH de la solution du sol .....  | 46 |
| Tableau 20 : Teneur du sol en matière organique .....  | 46 |
| Tableau 21 : Répartition du cuivre dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage .....              | 52 |
| Tableau 22 : Répartition du Fe, Mn, et Zn dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage .....       | 53 |
| Tableau 23 : Répartition du B dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage .....                   | 54 |
| Tableau 24 : Répartition du Mg, P et K dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage.....           | 55 |
| Tableau 25 : Répartition du Na, et Ca dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage.....            | 56 |
| Tableau 26 : Répartition du bore dans le sol après le lessivage .....  | 60 |
| Tableau 27 : Répartition du fer et du zinc au niveau du sol après lessivage .....  | 61 |
| Tableau 28 : Distribution du Mn et du Cu dans le sol selon les doses de lessivage.....                                   | 61 |
| Tableau 29 : Répartition dans le sol du Na, et Mg après l'application des doses de lessivage .....                       | 62 |
| Tableau 30 : Répartition de k, Ca et P dans le sol après lessivage .....   | 63 |
| Tableau 31 : Répartition du bore dans le sol après lessivage .....   | 69 |
| Tableau 32 : Répartition du Mn dans le sol après lessivage.....  | 69 |
| Tableau 33 : Répartition dans le sol du cuivre selon les doses de lessivage .....  | 70 |
| Tableau 34 : Distribution di zinc dans le sol selon les doses de lessivage .....   | 70 |
| Tableau 35 : Répartition du fer dans le sol selon les doses de lessivage.....  | 71 |
| Tableau 36 : Répartition du Mg, K et P selon les doses de lessivage.....   | 72 |
| Tableau 37 : Répartition du Na et Ca selon les doses de lessivage .....  | 73 |
| Tableau 38 : Répartition des différents oligo-éléments apporté.....  | 74 |
| Tableau 39 : Distribution du Mg, Ca, Na, K, et P .....   | 76 |

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Blé atteint d'une carence en cuivre .....   | 6  |
| Figure 2 : Origine des oligo-éléments dans le sol .....  | 7  |
| Figure 3 : Différents formes de cuivre dans le sol en fonction des échanges entre les compartiments du sol .....                           | 13 |
| Figure 4 : Synthèse des relations entre les trois composantes de la biodisponibilité des oligo-éléments métalliques pour les plantes ..... | 14 |
| Figure 5 : Localisation des oligo-éléments métallique dans le sol .....  | 18 |
| Figure 6 : Spéciation du cuivre en équilibre avec le cuivre du sol en fonction de pH .....   | 20 |
| Figure 7 : Différentes formes du fer selon le pH .....   | 20 |
| Figure 8 : Constituants de la matière organique des sols .....   | 22 |
| Figure 9 : Nature minéralogiques .....   | 24 |
| Figure 10 : Schéma des mouvements de l'eau de gravité dans le sol .....  | 26 |
| Figure 11 : Localisation géographique du Domaine Louata .....  | 33 |
| Figure 12 : Précipitation mensuelles moyennes couvrant la période allant d'octobre à mai .....   | 34 |
| Figure 13 : Evolution des températures moyenne, maximale et minimale durant la campagne agricole 2017/2018 .....                           | 34 |
| Figure 14 : Représentation schématique du protocole expérimental adopté pour l'essai en colonne PVC .....                                  | 38 |
| Figure 15 : Dispositif expérimental de l'essai en colonne PVC .....  | 40 |
| Figure 16 : Dispositif expérimental adopté pour l'essai en colonne PVC .....   | 40 |
| Figure 17 : Représentation du protocole expérimental adopté pour les lysimètres .....  | 42 |
| Figure 18 : Représentation du protocole expérimental adopté pour les lysimètres au Domaine Louata .....                                    | 43 |
| Figure 19 : Schémas du dispositif expérimental adopté pour les lysimètres .....  | 44 |
| Figure 20 : Dispositif expérimental des lysimètres au Domaine Louata .....   | 44 |
| Figure 21 : Localisation géographique de l'essai des lysimètres au niveau du Domaine Louata .....  | 45 |
| Figure 22 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Cu selon les doses de lessivage .....   | 49 |
| Figure 23 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en oligo-éléments selon les doses de lessivage .....   | 50 |
| Figure 24 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Na, Mg, Ca et K selon les doses de lessivage .....  | 51 |
| Figure 25 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en B selon les doses de lessivage .....  | 57 |
| Figure 26 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Fe, Cu, Mn et Zn selon les doses de lessivage .....                                       | 58 |
| Figure 27 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Ca, Na, Mg et K selon les doses de lessivage .....  | 59 |
| Figure 28 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en B selon les doses de lessivage .....  | 64 |
| Figure 29 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Mn selon les doses de lessivage .....   | 65 |
| Figure 30 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Cu selon les doses de lessivage .....   | 66 |
| Figure 31 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Fe selon les doses de lessivage .....   | 66 |
| Figure 32 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Zn selon les doses de lessivage .....   | 67 |
| Figure 33 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Ca, et en Na selon les doses de lessivage .....   | 68 |
| Figure 34 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en K, et en Mg selon les doses de lessivage .....  | 68 |
| Figure 35 : Variation du pH selon les doses de lessivage et selon l'apport des oligo-éléments .....  | 73 |

## LISTE DES ABREVIATIONS

**AB-DTPA** : Ammonium Bicarbonate- Acide Diéthylène Triamine Penta Acétique ;

**B** : Bore ;

**Cd** : Cadmium ;

**CEC** : Capacité d'Echange Cationique ;

**Cl** : Chlore ;

**Cu** : Cuivre ;

**DBAC** : Dispositif en Bloc Aléatoire Complet ;

**DTPA** : Acide Diéthylène Triamine Penta Acétique ;

**Echng.** : Echangeable ;

**Extr** : Extraction

**EDDHA** : Acide Ethylène Diamine Tétraacétique-N, N (ortho hydroxyphényl acétique) ;

**EDTA** : Acide Ethylène Diamine Tétra Acétique ;

**Ec** : Conductivité Electrique ;

**Fe** : Fer ;

**K** : Potassium ;

**Mn** : Manganèse ;

**Mo** : Molybdène ;

**MO** : Matière Organique ;

**Na** : Sodium ;

**P** : Phosphore ;

**PVC** : Colonne Polyéthylène Vényl ;

**Pb** : Plombe ;

**ppm** : Partie Par Million ;

**SAU** : Surface Agricole Utilisé ;

**S-N-K**: Student Newman-Keuls;

**Zn** : Zinc

# SOMMAIRE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCTION GENERAL.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>I. Oligo-éléments dans l'agriculture .....</b>                                       | <b>4</b>  |
| 1. Généralités.....   | 4         |
| 2. Rôles physiologiques des oligo-éléments.....   | 4         |
| 3. Carences et symptômes .....  | 5         |
| <b>II. Oligo-éléments dans le sol .....</b>   | <b>7</b>  |
| 1. Origines des oligo-éléments dans les sols .....                                      | 7         |
| 2. Teneurs totales des oligo-éléments.....  | 8         |
| 3. Compartimentation.....   | 11        |
| 4. Biodisponibilité .....   | 14        |
| <b>III. Comportement des oligo-éléments dans les sols : principaux phénomènes .....</b> | <b>15</b> |
| 1. Précipitation.....   | 15        |
| 2. Complexation / création d'un nouveau composé chimique.....                           | 16        |
| 3. Phénomène d'Adsorption .....   | 16        |
| <b>IV. Mobilité des oligo-éléments.....</b>   | <b>17</b> |
| 1. Généralité .....   | 17        |
| 2. Facteurs influençant la mobilité des oligo-éléments .....                            | 18        |
| 2.1. pH du sol .....  | 18        |
| 2.2. Effet cationique /CEC.....   | 20        |
| 2.3. Teneur en matière organique .....  | 21        |
| 2.4. Condition d'oxydoréduction du milieu .....   | 22        |
| 2.5. Température/ Humidité .....  | 23        |
| 2.6. Nature du sol .....  | 23        |
| 2.6.1. Généralité .....   | 23        |
| 2.6.2. Constituants du sol .....  | 24        |
| <b>V. Méthodologies d'évaluation du comportement des oligo-éléments.....</b>            | <b>25</b> |
| 1. Mesure oblique de la mobilité des oligo-éléments dans les sols en place .....        | 25        |
| 2. Evaluation en batch .....  | 26        |
| 3. Evaluation en continue .....   | 27        |
| <b>VI. Méthodes d'extraction des oligo-éléments au niveau du sol.....</b>               | <b>27</b> |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| 1.           | Extraction du Mn, Fe, Cu et Zn.....                                   | 27        |
| 2.           | Extraction à l'eau bouillante du bore.....                            | 28        |
| <b>VII.</b>  | <b>Normes internationales d'interprétation des analyses .....</b>     | <b>29</b> |
| <b>VIII.</b> | <b>Synthèse des travaux expérimentaux sur la mobilité .....</b>       | <b>30</b> |
|              | <b>MATERIEL ET METHODES .....</b>                                     | <b>32</b> |
| <b>I.</b>    | <b>Présentation du site expérimental .....</b>                        | <b>33</b> |
| 1.           | Situation géographique.....   | 33        |
| 2.           | Contexte climatique.....  | 33        |
| 2.1.         | Pluviométrie .....  | 34        |
| 2.2.         | Températures .....  | 34        |
| <b>II.</b>   | <b>Présentation des essais .....</b>                                  | <b>35</b> |
| 1.           | Essai en colonne PVC .....  | 35        |
| 1.1.         | Caractéristiques du sol étudié.....                                   | 35        |
| 1.1.1.       | Site de prélèvement .....   | 35        |
| 1.1.2.       | Analyse du sol .....  | 35        |
| 1.2.         | Caractéristiques physico-chimiques du sol.....                        | 35        |
| 1.2.1.       | Granulométrie.....  | 35        |
| 1.2.2.       | Teneur totales des composants du sol.....                             | 36        |
| 1.3.         | Mise en place et conduite de l'essai .....                            | 37        |
| 1.3.1.       | Installation des colonnes de lessivage / apport d'oligo-éléments..... | 37        |
| 1.3.2.       | Traitements étudiés : Doses de lessivage testées.....                 | 39        |
| 1.3.3.       | Dispositif expérimental .....   | 39        |
| 1.3.4.       | Analyses chimiques .....  | 41        |
| a.           | Analyse chimique du lixiviat .....                                    | 41        |
| b.           | Analyse chimique du sol .....   | 41        |
| 1.4.         | Analyse statistique.....  | 41        |
| 2.           | Essai en lysimètre.....   | 42        |
| 2.1.         | Mise en place et conduite de l'essai .....                            | 42        |
| 2.1.1.       | Installation des lysimètres .....                                     | 42        |
| 2.1.2.       | Dispositif expérimental .....   | 43        |
| 2.1.3.       | Analyse du sol .....  | 45        |
| a.           | Granulométrie .....   | 45        |
| b.           | pH .....  | 46        |
| c.           | Matière organique.....  | 46        |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.2. Analyses chimiques .....  | 47        |
| 2.3. Analyse statistique.....  | 47        |
| <b>RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>I. Lessivage des oligo-éléments (Fe, Cu, Mn, Zn et B) dans les colonnes en PVC au niveau du sol argileux-calcaire .....</b> | <b>49</b> |
| I.1. Effet des doses de lessivage sur la mobilité du Cuivre apporté seul (Cu).....   | 49        |
| 1. Perte en cuivre par lessivage .....   | 49        |
| 2. Perte d'oligoéléments par lessivage .....   | 50        |
| 3. Pertes du profil de sol (0-30 cm) en cations selon les doses de lessivage .....   | 51        |
| 4. Distribution du cuivre dans le sol après lessivage.....   | 52        |
| 5. Distribution des oligo-éléments au sol selon les doses de lessivage .....   | 53        |
| 6. Distributions des autres éléments au niveau du sol après lessivage .....  | 54        |
| I.2. Effet des doses de lessivage sur la mobilité du bore apporté seul (B) .....   | 57        |
| 1. Perte du bore par lessivage .....   | 57        |
| 2. Perte en oligo-éléments par lessivage.....  | 57        |
| 3. Perte en d'autre éléments par lessivage.....  | 58        |
| 4. Distribution du bore au niveau du profil du sol (0-30cm).....   | 59        |
| 5. Distribution oligo-éléments après lessivage .....   | 60        |
| 6. Distribution des autres éléments au niveau du sol.....  | 62        |
| I.2. Effet des doses de lessivage sur la mobilité des oligoéléments (Fe, Cu, Mn, Zn, et B) apportés en mélange.....            | 63        |
| 1. Perte d'oligoéléments par lessivage .....   | 63        |
| 2. Pertes du profil de sol (0-30 cm) des autres cations selon les doses de lessivage .....                                     | 67        |
| 3. Distribution des oligo-éléments au niveau du profil du sol (0-30cm) .....   | 68        |
| 4. Distribution des autres éléments dans le sol après le lessivage .....   | 71        |
| 5. Effet de l'apport du mélange (Zn, Cu, Mn, Fe, et B) sur le pH du sol .....  | 73        |
| <b>II. Lessivage des oligo-éléments (Fe, Cu, Mn, Zn et B) dans les lysimètres au niveau du sol argileux .....</b>              | <b>74</b> |
| 1. Effet de l'irrigation et des conditions climatique sur la distribution du mélange (Cu, Zn, B, Mn, et Fe) .....              | 74        |
| 2. Effet de l'irrigation et des conditions climatique sur la distribution des autres éléments .....                            | 76        |
| <b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....</b>   | <b>77</b> |
| <b>Conclusion .....</b>  | <b>78</b> |
| <b>Recommandations .....</b>   | <b>79</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>  | <b>80</b> |

## INTRODUCTION GENERALE

La pollution de l'environnement constitue depuis longtemps une préoccupation majeure des sociétés, d'ailleurs la protection de l'environnement et la gestion efficace des ressources naturelles, sont devenues des besoins primordiaux.

Parmi les différentes catégories de pollution organique et/ou minérale, le problème posé par l'accumulation des éléments traces en l'occurrence les oligo-éléments, dans le sol ou bien leur transfert dans les nappes phréatiques.

Les oligoéléments sont des éléments nutritifs indispensables, en quantité très faible par rapport aux éléments majeurs. Ceux qui sont actuellement prouvés, comme essentiels pour l'agriculture, à savoir le cuivre (Cu), le bore (B), le manganèse (Mn), le fer (Fe), le molybdène (Mo), le chlore (Cl), et le Zinc (Zn) (Loué, 1993). Ces derniers coexistent dans le sol sous différentes formes (Juste, 1988). Ils peuvent être des cations métalliques comme le Cuivre, Fer, Manganèse et le Zinc, ou bien sous formes des molécules neutres ou d'anions dans la solution du sol (B, Mo et Cl).

Il est à noter que le problème ne réside pas uniquement dans la présence de ces éléments dans le sol mais, aussi dans leur mobilité et leur transfert. D'où l'intérêt d'une bonne connaissance de ces mécanismes.

Aujourd'hui, vu les quantités énormes des fertilisants apportés à l'agriculture, la maîtrise des flux des éléments apportés s'impose pour une contribution à la bonne préservation du milieu. Ce qui nécessite une bonne connaissance de l'état des sols, et de leurs caractéristiques. Que ce soit en matière de fertilité du sol ou d'évaluation de la sensibilité environnementale. Parmi les préoccupations environnementales figurent la mobilité des éléments fertilisants.

Au Maroc, peu d'études menées sur le devenir des oligoéléments dans le sol. Par ailleurs, l'évaluation de la mobilité de ces derniers dans le sol est très importante dans la gestion des plans de fumure oligo-minérale.

En effet, l'étude de la mobilité des éléments chimiques devient considérable, surtout dans la province de Ségrou, qui se caractérise par une activité agronomique très importante,

dont on trouve 15015Ha du SAU (surface agricole utilisable) (DPA, 2013), et une utilisation remarquable des engrais qui atteint 72% (DPA, 2016), où les sols ont une texture fine (argileuse), connus par leur forte capacité d'échange cationique, et une forte teneur en matière organique.

Cette étude conduite au Domaine Louata, qui relève de la société ' Providence Verte ' s'inscrit dans cette thématique globale de gestion et de conservation des sols. Et concerne en particulier l'étude de la mobilité des oligo-éléments dans le sol de la province de Sэфrou.

Elle a pour objectif d'évaluer la mobilité et le risque de lessivage de cinq oligoéléments ; Mn, Cu, Fe, B et le Zn dans le sol argileux-calcaire.

Pour ce faire deux types d'essais expérimentaux sont employés : suivi de la mobilité dans des colonnes PVC, et suivi au niveau des lysimètres dans le champ.

Par conséquent, le mémoire est présenté sous forme de trois parties :

- ❖ la première partie, est consacrée à une synthèse bibliographique s'attachant à résumer d'une manière globale les principales informations sur les éléments étudiés, ainsi que les méthodologies couramment utilisées pour évaluer leur comportement et leur mobilité.
- ❖ la deuxième partie, présente la partie matériel et méthodes qui décrivent les méthodologie et les outils utilisé dans la réalisation de cette étude.
- ❖ La troisième partie, elle concerne les résultats et discussion, qui présente les principaux résultats obtenus du travail et leur interprétation.

Enfin, une conclusion générale résumera les principaux acquis de cette étude et précisera des perspectives pour la poursuite de ce travail.

# REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

---

## **I. Oligo-éléments dans l'agriculture**

### **1. Généralités**

Les oligo-éléments sont utilisés en faible quantité par les plantes, mais ils ne sont pas moins indispensables que les macroéléments (Fagéria, 2002). Ils contribuent à différentes fonctions physiologiques des plantes (Parent et Rivest, 2003). Même si les besoins en éléments mineurs des plantes sont faibles, des carences peuvent se traduire par une diminution du rendement et de la qualité de la récolte (Tran et *al.*, 1995). En effet, chaque fois que l'offre d'un ou de plusieurs de ces éléments est insuffisante, les rendements seront réduits et la qualité des produits végétaux est altérée, mais le comportement des espèces voire des variétés varie considérablement selon leur sensibilité aux carences. (Loué, 1993). Globalement les quantités absorbées par les plantes sont positivement corrélées à la quantité d'ions libres en solution à proximité des racines (Quartacci et *al.*, 2009).

### **2. Rôles physiologiques des oligo-éléments**

Les oligo-éléments jouent un rôle important dans les activités enzymatiques. Selon le besoin en éléments minéraux des enzymes, on peut distinguer deux catégories; Les enzymes pour lesquelles il a été montré qu'un élément minéral spécifique en est un composant intégral (fer, cuivre, zinc, molybdène) (Coïc et Coppenet, 1989). Et celles pour lesquelles un ou plusieurs éléments agissent comme activateur manganèse, par exemple, (Coïc et Coppenet, 1989). Les besoins sont en fonctions de l'élément, de la culture et/ou de l'organe considéré ainsi que des conditions du milieu (Loué, 1993).

Le Fer par exemple est un constituant des cytochromes et des métallo enzymes, il joue un rôle dans la photosynthèse, le métabolisme, et dans les réactions d'oxydoréduction. Alors que le Cuivre entre dans la composition de plusieurs enzymes, impliqué dans la photosynthèse, la respiration, le métabolisme des protéines et des glucides, lignification et formation de pollen. Une teneur en cuivre comprise entre 5 et 20 ppm est nécessaire dans le tissu des plantes pour une croissance normale. Une teneur inférieure à 4 ppm est considérée comme insuffisante et une supérieure à 20 ppm comme excessive (Nriagu, 1979; Robson et Reuter, 1981; Alloway, 1995; Stevenson, 1986).

Le Manganèse joue le rôle d'un photolyse de l'eau dans les chloroplastes, c'est un régulateurs des activités enzymatiques, et entre dans la Protection contre les dommages oxydatifs des membranes. Pour le Bore (B) c'est un élément essentiel dans le métabolisme et transport des

hydrates de carbone, il entre dans la régulation des tissus méristématiques, Intégrité des membranes, aussi intervient dans le bore joue un rôle dans la synthèse d'ADN, et dans la formation de pollen et pollinisation.

Dernièrement, on trouve le Zinc (Zn) entre dans la constitution, la régulation et la synthèse d'auxine et dans la formation de pollen.

### **3. Carences et symptômes**

La carence en un oligo-élément est en relation avec son rôle nutritif dans la plante. (Coic et Coppenet, 1989). Les carences en oligo-éléments sont très répandues en sol calcaire, puisque leur pH alcalin provoque l'insolubilisation des oligo-éléments sauf pour le cas du molybdène. (Dekki, 2012).

Ils peuvent se traduire par plusieurs formes selon l'élément en question (tableau 1); par exemple pour le Bore elle se traduit par une chlorose et brunissement des jeunes feuilles, perturbation du développement de fleurs, des lésions de la moelle et des racines « pourriture du cœur ». Chez la betterave, tournesol, colza, choux, vigne, coton, les symptômes habituellement rencontrés lors d'une carence sont une croissance réduite (Lipman et Mackinney, 1931; Sommer, 1931), une déformation des jeunes feuilles, une nécrose du méristème apical, une chlorose et la fanaison des jeunes pousses. Chez les citronniers ou les orangers, cette carence entraîne une chute des jeunes feuilles connue sous le terme de mort estivale (Hopkins, 2003).

Pour le Cuivre Les symptômes habituellement rencontrés lors d'une carence sont une croissance réduite (Lipman et Mackinney 1931; Sommer 1931), une déformation des jeunes feuilles, une nécrose du méristème apical, une chlorose et la fanaison des jeunes pousses (Figure 1). Chez les citronniers ou les orangers, cette carence entraîne une chute des jeunes feuilles connue sous le terme de mort estivale (Hopkins 2003).



**Figure 1 : Blé atteint d'une carence en cuivre (Reid, 2006)**

Alors que la carence pour le Fer se traduit par un jaunissement internervaire des jeunes feuilles, par une croissance ralentie, aussi par une nécrose de la feuille. Pour les vignes, les agrumes, maïs, soja, et les arbres fruitiers. D'un autre part le manque du Manganèse peut entraîner une chlorose internervaire, et un mauvais remplissage des épis. Chez le blé, l'avoine, sorgho, pois, l'haricot, et soja. Pour le cas du Zinc la carence peut être traduite par une chlorose et une réduction de la croissance, aussi par des blanchissements des jeunes feuilles. Chez le maïs, l'haricot, soja, lin, pomme de terre, et les arbres fruitiers.

**Tableau 1 : Symptômes de carences en oligo-éléments (Coic et coppenet, 1989)**

| <b>Oligo-éléments</b> | <b>Symptômes de carence</b>  |
|-----------------------|--|
| <b>Fer</b>            | Jaunissement internervaire, croissance ralentie, briment de la feuille     |
| <b>Manganèse</b>      | Chlorose internervaire, mauvais remplissage des épis                       |
| <b>Cuivre</b>         | Chlorose des jeunes feuilles, stérilité des épis                           |
| <b>Zinc</b>           | Chlorose et réduction de la croissance, blanchissement des jeunes feuilles |
| <b>Bore</b>           | Jaunissement des feuilles, taches sur les feuilles, mauvaise pollinisation |

Chaque oligo-élément présent une teneur critique soit dans les plantes soit dans les sols (tableau 2).

**Tableau 2 : Teneurs critiques en oligo-éléments dans les plantes et dans les sols (Fageria et al ,2002)**

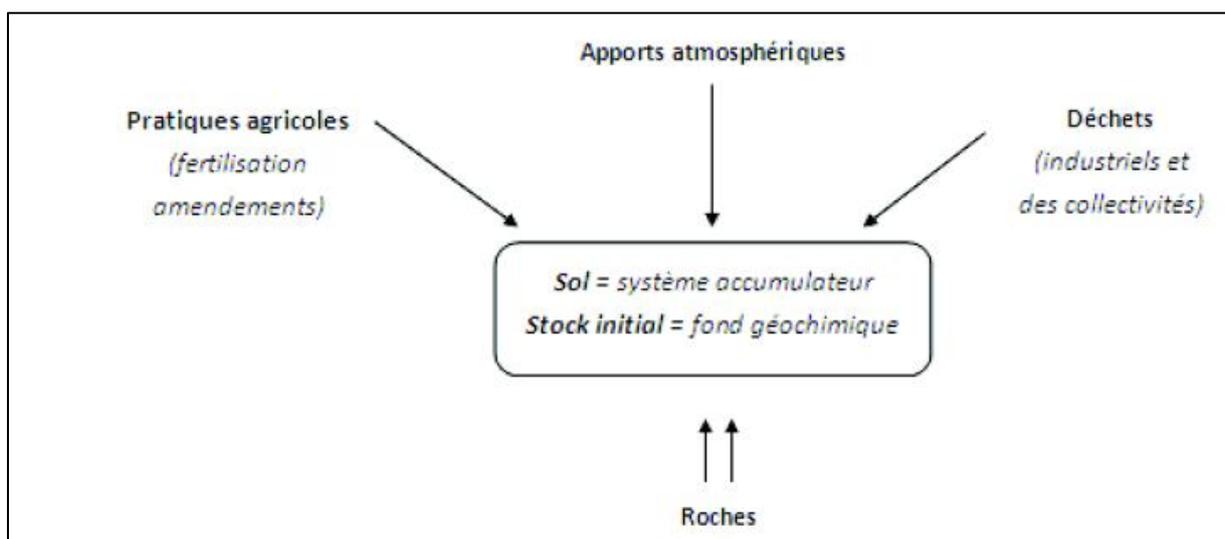
| Elément   | Teneur critiques dans la plante (ppm) |           | Teneur critiques dans le sol (ppm) |             |
|-----------|---------------------------------------|-----------|------------------------------------|-------------|
|           | Déficiência                           | Toxicité  | Déficiência                        | Toxicité    |
| <b>B</b>  | 10                                    | 50 – 200  | 0.8 (betterave)                    | 15 – 25     |
| <b>Cu</b> | 3 - 5                                 | 20 - 100  | 1.1 orge                           | 60 - 125    |
| <b>Fe</b> | 50                                    | 1000      | 4.5 sorgho                         | ---         |
| <b>Mn</b> | 10 – 20                               | 300 - 500 | 3 mais                             | 1000 – 3000 |
| <b>Zn</b> | 15 – 20                               | 100 - 400 | 0.86 mais                          | 70 - 400    |

## II. Oligo-éléments dans le sol

### 1. Origines des oligo-éléments dans les sols

La concentration en éléments mesurée dans les sols, résulte de l'altération de la roche mère, due à des processus de pédogenèse.

Les oligoéléments métalliques peuvent être apportés par voie aérienne, sous forme de microparticules issues des rejets atmosphériques de certaines industries, notamment des fonderies (Douay et *al.*, 2008).



**Figure 2 : Origine des oligo-éléments dans le sol (Robert et Juste, 1999; in Albain, 2000)**

## 2. Teneurs totales des oligo-éléments

Les changements des teneurs totales en oligo-éléments des sols sont plus importants que celles des macroéléments.

La teneur des sols en oligo-éléments dépend surtout de leur nature pédologique et de leur texture (Giroux et *al.*, 1992), mais également leur minéralogie à savoir, si les sols sont de nature calcaire ou siliceuse (Tyler et Zohlen, 1998). Cependant, la disponibilité des oligo-éléments à la plante est influencée par des facteurs anthropiques, en l'occurrence les pratiques agricoles de fertilisation (Deschênes et *al.*, 2006).

**Tableau 3 : Teneurs totales et échangeable des oligoéléments dans le sol (Coic et Coppenet, 1989)**

| Elément          | Teneur totale au sol (ppm) | Teneur échangeable (ppm) |
|------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>Manganèse</b> | 200-1000                   | 1-2                      |
| <b>Fer</b>       | 10000-50000                | -----                    |
| <b>Zinc</b>      | 10-100                     | 0,2-0,5                  |
| <b>Cuivre</b>    | 8-40                       | 0,2-0,5                  |
| <b>Bore</b>      | 5-80                       | 0,1-0,5                  |

D'après Krauskopf, (1972) la teneur en oligo-éléments au niveau des roches change selon leurs natures, et que cette teneur diffère dans les sols (Tableau 4).

**Tableau 4 : Teneurs en oligo-éléments dans les roches et le sol (Krauskopf, 1972 ; in loué, 1993) (teneurs en ppm de terre)**

| Elément   | Granites | Basaltes | Calcaire | Grés     | Schistes | Sols                              |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------------|
| <b>Fe</b> | 27000    | 86000    | 3800     | 9800     | 47000    | 10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup> |
| <b>Mn</b> | 400      | 1500     | 1100     | 10 - 100 | 850      | 30 – 3000                         |
| <b>Zn</b> | 40       | 100      | 20       | 16       | 95       | 10 – 300                          |
| <b>Cu</b> | 10       | 100      | 4        | 30       | 45       | 10 – 80                           |
| <b>B</b>  | 15       | 5        | 20       | 35       | 100      | 7 – 80                            |

### **a. Fer total**

Le Fer est l'oligoélément le plus abondant dans les sols. Il vient en quatrième rang en termes de teneur totale parmi les éléments chimiques qui forment la croûte terrestre, (Coic et Coppenet, 1989).

En général les sols contiennent en moyenne 5 % de Fe, alors que les sols ferrugineux renferment des doses plus élevées (>10 %), quant aux sols sableux ils contiennent des quantités minimales (environ 1 pour cent) et pour les sables acides lessivés contiennent les doses les plus faibles

(< 1 %). Les teneurs du fer diffèrent selon le type de sol mais généralement, la teneur des sols en Fe total ne règle pas la nutrition des cultures en Fe (Kabata-Pendias et Pendias, 1984).

### **b. Bore total**

La teneur en bore total dans la plupart des sols agricoles, varie de 1 à 467 mg/kg, avec une teneur moyenne de 9 à 85 mg/kg (Kabata-Pendias, 1984).

Les variations entre les sols dans la teneur totale en B sont principalement attribuées aux types de roche mère et les types de sol relevant de zones géographiques et climatiques divergentes. Le B est généralement élevé dans les sols provenant de sédiments marins. Et les valeurs les plus faibles se trouvent sur les sols à texture grossière, et dans les sols à faible teneur en matière organique. En revanche, les sols à texture fine tels que les sols argileux sont plus riches en B total. (Gounou, 2008).

### **c. Manganèse total**

La teneur en Manganèse total varie considérablement en fonction de la nature du sol, de l'état de trace il arrive jusqu'à 10 %. Toutefois, la teneur se situe le plus souvent entre 30 et 3 000 ppm, avec une moyenne de 450 ppm (Adriano, 1986).

Les conditions favorisant la formation et le lessivage de  $Mn^{2+}$  peuvent faire baisser la teneur en Mn total. C'est le cas, en particulier, des sols podzoliques acides. La teneur des sols en Mn total est toutefois, un faible indicateur des possibilités d'absorption de Mn par les plantes (Kabata-Pendias, 1984).

#### d. Cuivre total

La concentration totale de cuivre dans le sol est comprise entre 2 et 200 mg/kg, avec une concentration moyenne de l'ordre de 30 mg/kg (Adriano, 1986).

Le cuivre est plus abondant dans les sols basaltiques (100 ppm) que dans les sols granitiques. (10 ppm). La teneur en Cu total diffère beaucoup en fonction de la texture du sol. Elle augmente lorsque celle-ci est fine (Kabata-Pendias, 1984).

Les concentration en cuivre diffèrent selon le type du milieu et changent avec sa nature (Tableau 5).

**Tableau 5 : Synthèse des différentes concentrations ubiquitaires du cuivre dans les fonds géochimiques (Alloway *et al.*, 1995)**

| Milieux |                     | Concentration              |
|---------|---------------------|----------------------------|
| Air     |                     | 5-50ng / m <sup>3</sup>    |
| Eaux    | Eaux de mer         | 0.05-12 ug.L <sup>-1</sup> |
|         | Eaux douces         | 5-30 ug .L <sup>-1</sup>   |
| Sols    | Sols                | 2-250 ppm                  |
|         | Sédiments           | 2-5000 ppm                 |
|         | Roches volcaniques  | 13 -90 ppm                 |
|         | Roches Sédimentaire | 5-39 ppm                   |
|         | Croute Terrestre    | 24-70ppm                   |

**Tableau 6 : Principales propriétés physico-chimiques du cuivre aux conditions de pression et température ordinaires**

|                         |  |
|-------------------------|--|
| N° atomique             | 29                                     |
| Masse molaire           | 63,5 g .mol <sup>-1</sup>              |
| Densité                 | 8.9 g cm <sup>-3</sup>                 |
| T° de fusion            | 1084 °C                                |
| T° de vaporisation      | 2567°C                                 |
| Conductivité électrique | 59.6 10 <sup>5</sup> S.m <sup>-1</sup> |
| Conductivité thermique  | 401m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>     |

### e. Zinc total

Le zinc est un élément chimique de transition, son nombre atomique égal à 30. Il est le 23<sup>ème</sup> abondant élément dans la terre (Broadley et al., 2007 in Drissi, 2011). Il présente à peu près 0,004% dans la croûte terrestre (Browning, 1969 in Drissi, 2011). Les minerais de zinc les plus répandus dans la nature sont la sphalérite (ZnS) et la smithsonite Zn (CO<sub>3</sub>). La teneur total en zinc varie entre 10 ppm et 100ppm, alors que la teneur échangeable varie de 0,2 ppm et 0,5ppm (Coic et Coppenet, 1989).

## 3. Compartimentation

Les oligo-éléments peuvent se présenter sous 5 principaux états (Baize et al., 2005), soit sous :

- La forme soluble libre dans la solution du sol,
- La forme échangeable qui se trouve sous forme liée par des charges électriques aux particules colloïdales du sol,
- La forme chélatée ou complexée où les ions forment des composés complexes avec des ligands issus de la matière organique du sol,
- La forme liée aux oxydes métalliques (oxydes de Fe et de Mn) et aux minéraux secondaires insolubles,
- La forme intégrée dans les réseaux silicatés des minéraux primaires.

### a. Fer

Les formes de Fe dans le sol comprennent des oxydes, des sulfures et des silicates ; l'olivine [(Mg, Fe) 2SiO<sub>4</sub>], la sidérite (FeCO<sub>3</sub>), l'hématite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la goethite (FeOOH) et de la magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) constituent les minéraux primaires et secondaires communs (Brady et Weil, 2004).

Les formes inorganiques solubles comprennent : Fe<sup>3+</sup>, Fe (OH)<sub>2</sub>, Fe (OH)<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe (OH)<sub>3</sub>, et Fe(OH)<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Kabata-Pendias, 1984).

### b. Bore

Le bore est adsorbé sur les oxydes d'aluminium et de fer, des minéraux d'argile, le carbonate de calcium, et la matière organique (Goldberg, 1997), dans la solution du sol, le B existe principalement, sous forme d'acide non dissocié H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> dont, il représente la forme prédominante dans les sols à pH au-dessous de 9,2.

### c. Manganèse

Le Mn dans les sols est oxydée pour former des minéraux secondaires, dont la pyrolusite ( $\text{MnO}_2$ ), l'hausmannite ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) et le manganite ( $\text{MnOOH}$ ). La Pyrolusite et le manganite sont les formes les plus abondantes de Mn (Havlin et al., 2005).

Dans la solution le Mn existe principalement dans trois états de valence,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  et  $\text{Mn}^{2+}$ . La forme la plus commune en solution est  $\text{Mn}^{2+}$ . Il est principalement contrôlé par  $\text{MnO}_2$  et varie d'environ 0 à 10 ppm (Havlin et al., 2005).

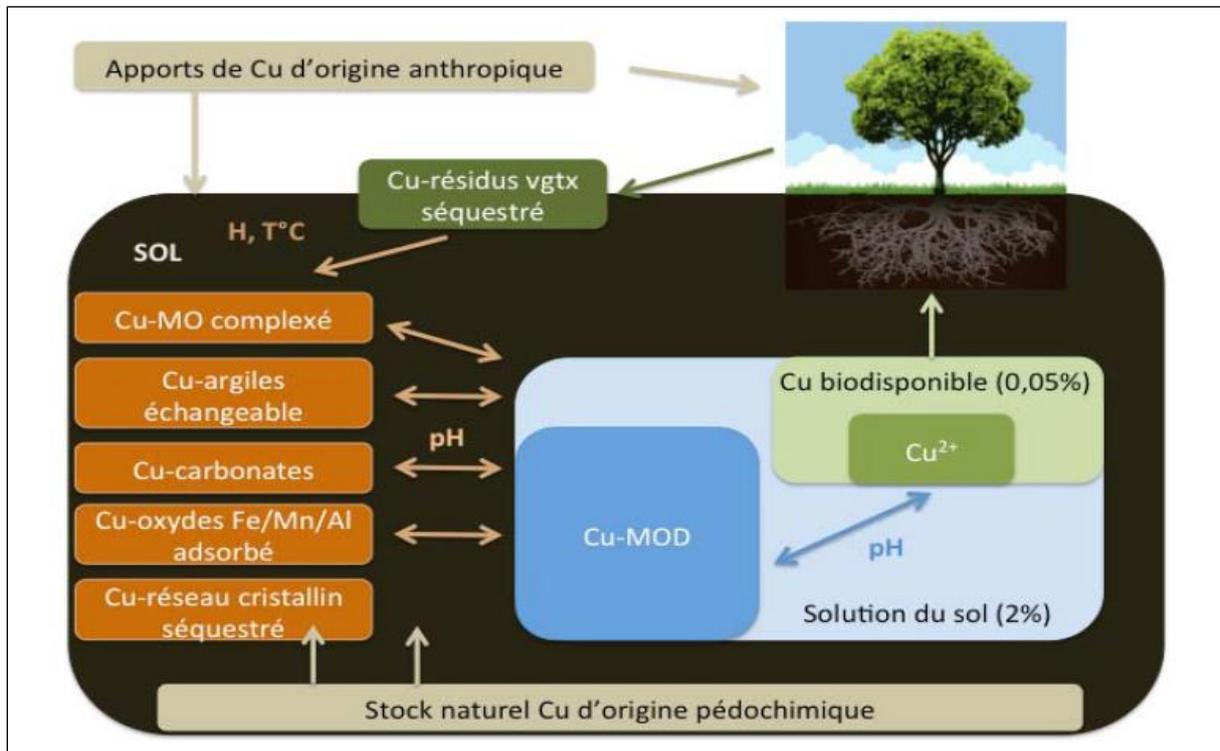
Le Mn est réduite en  $\text{Mn}^{2+}$  par les bactéries dans des conditions d'anaérobie (hydromorphie) durant des semaines dans la plupart des sols (Ponnamperuma, 1972). Le Mn dans la solution du sol ( $\text{Mn}^{2+}$ ) augmente dans des conditions acides et peut être lixivié dans des sols à texture grossière. Au-dessus 8,5 de pH, la solubilité du  $\text{Mn}^{2+}$  est très faible (Kyuma, 2004).

### d. Cuivre

C'est le 26<sup>ème</sup> élément le plus abondant sur la terre, Il s'associe à la matière organique, aux oxydes de fer et de manganèse, et aux argiles, (Alloway, 1995). C'est un des éléments trace les moins mobiles qui tend à rester « fixé » du fait principalement de sa forte affinité pour la matière organique vivante ou en décomposition.

Le Cu dans le sol est inclus dans les minéraux primaires ; malachite ( $\text{Cu}_2\text{OH}_2\text{CO}_2$ ) et ferrite cuivrique ( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ) (Havlin et al., 2005).

Dans les solutions de sol à pH supérieur à 7, le Cu se trouve majoritairement sous forme  $\text{Cu}^{2+}$  (Lindsay, 1979 ; McBride, 1989)  $\text{CuOH}^+$  et  $\text{Cu}(\text{OH})_2^{2+}$  (Kabata Pendias, 2010). Tandis qu'à pH >7, on trouve majoritairement le cuivre en solution sous forme  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  (Lindsay, 1979),  $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$  et  $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$  (Kabata Pendias, 1984).



**Figure 3 : Différents formes de cuivre dans le sol en fonction des échanges entre les compartiments du sol (MOD = matières organiques dissoutes, humidité)**

#### e. Zinc

Le zinc est généralement présent sous forme de  $Zn^{2+}$  (Gwrtac, 1997). Il a tendance à s'adsorber à la surface des minéraux argileux et de la matière organique, ainsi qu'à se complexer avec les carbonates et les oxydes hydratés de fer et de manganèse (Alloway, 1990).

Sous un pH acide, le zinc semble être retenu par des sites d'échanges cationiques, alors que sous conditions basiques, il présente une rétention davantage attribuable à des phénomènes de « chemisorption ». Le zinc se localise dans 5 compartiments du sol :

- Zinc de la solution du sol : Il est sous forme de  $Zn^{2+}$  et  $Zn(OH)^+$  (Alloway, 2008),
- Zinc échangeable et C'est le zinc lié aux particules du sol (Alloway, 2008),
- Zinc organique où les ions du zinc sont chélatés, adsorbés ou font partie intégrante des molécules organiques,
- Zinc non échangeable correspond au zinc adsorbé par les minéraux d'argile et les oxydes métallique non soluble (Alloway, 2008),
- le Zinc issue de l'altération des minéraux primaires et secondaires,

Le zinc peut également former des complexes avec des ligands inorganiques et organiques, sous conditions basiques (Alloway, 1990),

#### 4. Biodisponibilité

La biodisponibilité d'un élément est son aptitude à être transféré d'un compartiment du sol vers un organisme vivant (Juste, 1983), elle est mesurée par les quantités extraites par les différents réactifs d'extraction des tests du sol en parallèle avec les quantités absorbées par les plantes (Loué, 1993).

Selon Baize (1997), dans une parcelle donnée, la biodisponibilité d'un élément peut être évaluée par la mesure de sa concentration dans les plantes. La plante représente effectivement le réactif d'extraction qui traduit le mieux la biodisponibilité réelle, car elle intégrerait tous les facteurs liés aux sols et à l'élément (Juste, 1988).

L'évaluation de la biodisponibilité ne peut pas se faire seulement par la connaissance des quantités totales de l'élément dans le sol (Wightwick et *al.*, 2008) ; elle dépend de la spéciation de l'élément et des conditions physico-chimique du milieu qui sont susceptibles de modifier cette spéciation vers des formes chimiques plus ou moins assimilables (Alloway, 1995).

En effet les oligoéléments disponibles pour les cultures représentent une proportion très faible par rapport aux teneurs totales dans le sol ( Coïc et Coppenet, 1989). Aujourd'hui il semble assez bien établi que l'assimilation des éléments chimiques par les cellules vivantes se fait par complexation à des petites molécules organiques, comme par exemple les phytosidérophores dans le cas du fer (Roberts et *al.*, 2004).

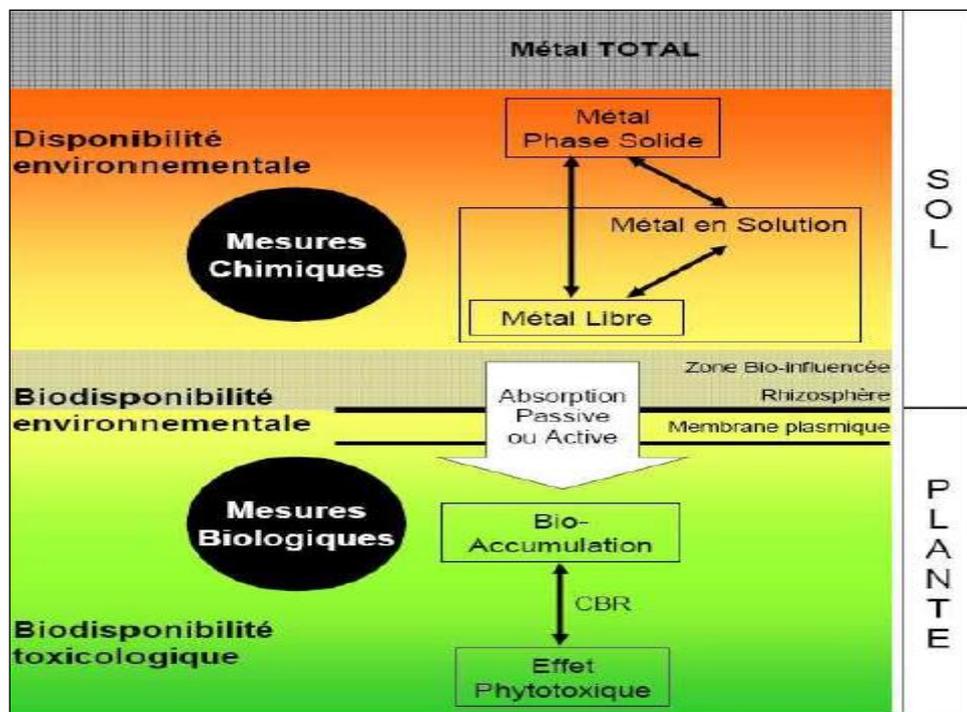


Figure 4 : Synthèse des relations entre les trois composantes de la biodisponibilité des oligo-éléments métalliques pour les plantes (Bravin, 2008)

### **III. Comportement des oligo-éléments dans les sols : principaux phénomènes**

La connaissance des propriétés physico-chimiques des oligo-éléments dans les sols permet de mieux appréhender leurs mécanismes de transformation et de transfert, et ainsi de mieux prévoir leur lessivage. Néanmoins les réactions sol-oligo-éléments sont nombreuses et les interactions, souvent difficiles à identifier et à quantifier (Hlavackova, 2005).

Dans les sols, les oligoéléments se distribuent entre un certain nombre de compartiments en fonction des conditions physico-chimiques. Ils peuvent être camouflés à l'intérieur des réseaux silicatés, échangeables sur le complexe argilo-humique, adsorbés par les oxy-hydroxydes de fer, manganèse ou aluminium, complexés avec la matière organique, précipités sous forme minérale, ou soluble (Baize, 1997 ).

Les principaux mécanismes physico-chimiques qui interviennent dans les transferts des oligoéléments entre la phase liquide et solide dans le sol sont : précipitation/dissolution l'adsorption/désorption, complexation/dissociation et l'absorption. Ces différents mécanismes peuvent intervenir simultanément avec une importance relative selon la nature de l'oligoélément et les conditions physico-chimiques du milieu.

#### **1. Précipitation**

La précipitation ou la dissolution joue un rôle très important dans la chimie des sols, particulièrement dans la régulation des éléments majeurs comme le calcium, les carbonates et les silicates, mais également dans la rétention des métaux lourds. La précipitation est définie comme le passage à l'état solide d'un des solutés d'une solution (un produit dissous se transforme en état solide).

La co-précipitation se définit par la précipitation simultanée d'un élément chimique conjointement avec d'autres éléments (Zn, Pb, Cu, Ni, Cd) qui peuvent co-précipiter avec des oxydes de fer, de manganèse et des phyllosilicates, (Alloway, 1995).

La précipitation est généralement favorisée par des pH élevés, car la concentration en solution des ions d'hydroxyde ou de carbonate augmente avec le pH. (Hlavackova, 2005).

Le pH du sol et de la solution de sol, la température, le potentiel d'oxydo-réduction et la concentration en solutés sont les facteurs majeurs qui contrôlent la précipitation et la co-précipitation des oligoéléments métallique dans le sol (Fournier- Bidoz et Garnier Laplace, 1994).

Par contre, l'incidence de ce mécanisme peut devenir prédominante dans les cas des terrains contaminés où les concentrations des oligo-éléments sont significativement élevées, tels les parcs de résidus miniers (EPA, 1992).

Dans des conditions réductrices, le Fer par exemple apparaît en solution sous forme  $Fe^{2+}$ . Lorsque les conditions redeviennent oxydantes, le  $Fe^{2+}$  est réoxydé en  $Fe^{3+}$ , puis se précipite, sous forme d'oxyde de  $Fe^{3+}$ . Cela peut avoir comme conséquence la libération, puis une éventuelle précipitation sous une nouvelle forme des traces métalliques liées initialement aux oxydes de fer.

## 2. Complexation / création d'un nouveau composé chimique

Elle fait intervenir la formation de complexes solubles, chargés ou neutres entre des cations métalliques et des anions inorganiques ou organiques. Les complexes sont des entités chimiques qui possèdent une liaison de coordination entre un atome « donneur » (ligand avec au moins une paire d'électrons libres) et un atome ou un ion métallique « accepteur » (avec au moins un orbital vide) (Stumm et Morgan, 1996) Les cations métalliques, peuvent former des complexes avec différents ligands organiques et inorganiques présents dans la phase aqueuse du milieu (Evans, 1989). Ce processus de complexation, modifie sensiblement la rétention des oligo-éléments dans les sols et entraîne souvent un accroissement de la mobilité des éléments complexés. Les complexes solubles sont formés à partir de ligands organiques, tels des acides humiques et fulviques, tandis que les complexes inorganiques (carbonates, phosphate et sulfates) sont relativement insolubles (Gwrtac, 1997).

## 3. Phénomène d'Adsorption

L'adsorption est définie comme fixation de matière à l'interface solide - liquide (Sposito, 1989).

On en distingue trois types de mécanismes différents d'adsorption, Sposito (1989) soit :

- l'adsorption chimique ' chemisorption ' ;
- l'adsorption physique ' échange cationique ' ;
- la neutralisation des charges de surface négatives de certains constituants solides par les cations de la double-couche électrique.

### - Adsorption chimique : rétention spécifique

L'adsorption chimique constitue le résultat de l'établissement d'une liaison chimique entre les atomes donneurs d'électrons de la surface et les solutés accepteurs d'électrons. L'énergie de liaison est beaucoup plus forte que dans le cas de l'adsorption physique et le processus est

beaucoup moins réversible et parfois même irréversible (Pitter, 1999). D'après Sigg(1992), la complexation de la surface est le principal mécanisme de l'adsorption chimique des ions métalliques.

À faibles concentrations, les oligo-éléments sont adsorbés sur des sites de manière spécifique, il s'agit de l'adsorption dite chimique ou « chemisorption », qui implique la formation de liens ioniques et covalents entre les cations et le site d'adsorption (Dubé, 1997). Dans ces cas, il a été reconnu que les oxydes/hydroxydes d'aluminium (Al), de fer (Fe) et de manganèse (Mn) représentent les principales surfaces actives (Alloway, 1990).

D'une manière générale, les éléments métalliques deviennent beaucoup moins susceptibles d'être mobilisés. Le complexe formé fait intervenir des liaisons ioniques, covalentes ou une combinaison des deux (Blanchard, 2000), plus stables que la liaison électrostatique de l'adsorption non spécifique.

Le Cu peut être adsorbé principalement sur la matière organique et les oxydes de Fe et Mn (McLaren & Crawford, 1973). Les argiles, telles que la montmorillonite, semblent moins efficace pour l'adsorption du Cu. L'adsorption est plutôt spécifique et il existe peu d'échange cationique entre le Cu et les cations majeurs de la solution du sol. (Hlavackova, 2005).

#### - **Adsorption physique : échange cationique**

À des concentrations cationiques plus élevées, les sites d'adsorption spécifique deviennent saturés et les sites d'échanges ioniques entrent ensuite en fonctionnement (Epa, 1992).

L'adsorption dite physique ou "échange cationique", est attribuable à des forces électrostatiques de type « van der Waals » et à des mécanismes d'échange cationique (Dubé, 1997). Ce processus implique de façon plus importante les surfaces des minéraux argileux et de la matière organique. Présentant un niveau d'intensité moindre que l'adsorption spécifique, le processus d'échange cationique est un mécanisme de rétention réversible.

## **IV. Mobilité des oligo-éléments**

### **1. Généralité**

La mobilité est définie par la capacité d'un élément à migrer d'un point à un autre, à passer d'une forme chimique à une autre ou à changer de phase (passage de la phase solide à la phase liquide principalement). C'est l'aptitude de l'élément à se déplacer dans un profil de sol (Juste, 1988). Cette notion inclut implicitement le facteur temps sans le qualifier de façon précise. Ainsi, Gupta (1992) distingue une fraction mobile (à court terme) et une fraction mobilisable (à long terme).

La mobilité des oligoéléments dans le sol ne dépend pas seulement de leur concentration totale, mais aussi de leurs phases porteuses. En effet, un métal inclus dans un cristal ne passe pas facilement en solution, alors qu'un oligo-élément fixé par échange d'ions, sur une surface argileuse, ou sur les oxydes de Fe et de Mn, est plus facilement échangeable et par conséquent plus mobile. (Hlavackova, 2005).

Les variations des conditions physico-chimiques (pH, température, force ionique, etc.) peuvent jouer directement sur la mobilité des éléments, en faisant passer les éléments présents dans un sol, d'une forme à une autre. Ce changement met donc, en jeu des mécanismes biogéochimiques de mobilisation, d'immobilisation et de transport. Ces mécanismes dépendent de processus de dissolution/précipitation, désorption/adsorption et complexation qui font intervenir des réactions biologiques, chimiques et physico-chimiques (Bourrelier et Berthelin 1998).

Les oligo-éléments, à l'exception du B, sont considérés non mobiles, mais ils ont un mouvement faible par diffusion. (Dekki, 2012).

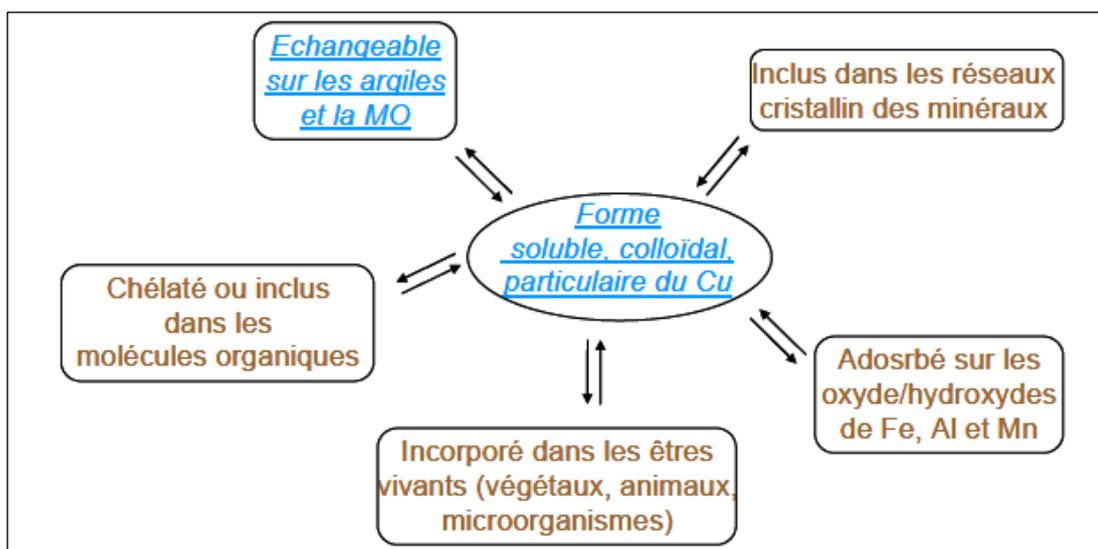


Figure 5 : Localisation des oligo-éléments métalliques dans le sol (Juste, 1995)

## 2. Facteurs influençant la mobilité des oligo-éléments

La mobilité des oligo-éléments dans un sol dépend de nombreux paramètres, (Morel, 1997) dont : Le taux d'argiles, et de matière organique, le pH, la capacité d'échange cationique, et le taux de calcaire actif ( $\text{CaCO}_3\%$ ).

### 2.1. pH du sol

Le pH du sol joue un rôle important dans la mobilité des oligo-éléments, il agit à la fois sur la solubilité des précipités et la stabilité des complexes en solutions, mais également sur les propriétés de rétention des métaux à la surface des solides par interactions électrostatiques

(Hlavackova, 2005). Ainsi, pour les éléments Cd, Cu, Ni, Pb et Zn, une augmentation du pH du sol se traduira généralement par une diminution de la mobilité. La variation du pH est le facteur dont l'action sur la mobilité des métaux est la plus déterminante. (Hlavackova, 2005).

L'abaissement du pH fournit au milieu des protons dont la fixation est fortement compétitive sur les sites d'échange, (Pickering, 1986). Alors que l'augmentation du pH réduit la solubilité Fe, figure (7), et plus particulièrement de Mn, à l'exception du Mo, qui devient moins disponible lorsque le pH du sol diminue. En outre, le B devient moins disponible lorsque le pH est <5 et encore lorsque le pH dépasse 7, (Truog, 1948).

Une croissance des formes de Zn échangeables est constatée en fonction de l'acidification du pH (Xian and Shokohifard, 1989), de même que l'adsorption de Zn tend à croître avec l'augmentation du pH (Loué, 1986); il est à citer pour le Mn que les conditions réductrices favorisent largement sa solubilité, il y aura la possibilité d'être adsorbé comme ion échangeable (Ellis et Knezek, 1972). Pour le cas du cuivre c'est à des pH<5 que le cuivre est le plus mobile et soluble. Par contre pH>7 il précipite sous la forme  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  en solution aqueuse, et n'est pratiquement plus mobile (Adriano, 1986) (tableau 7).

**Tableau 7 : Effet du pH sur la mobilité des oligo-éléments dans le sol ( Forstner, 1985)**

| Mobilité relative | pH               |                 |
|-------------------|------------------|-----------------|
|                   | Neutre – alcalin | Acide           |
| Très haute        | -                | B               |
| Haute             | -                | Zn, Mn          |
| Moyenne           | Mn               | Cu,             |
| Basse             | Fe, Zn           | Fe <sub>3</sub> |
| Très basse        | Cu               | Mo              |

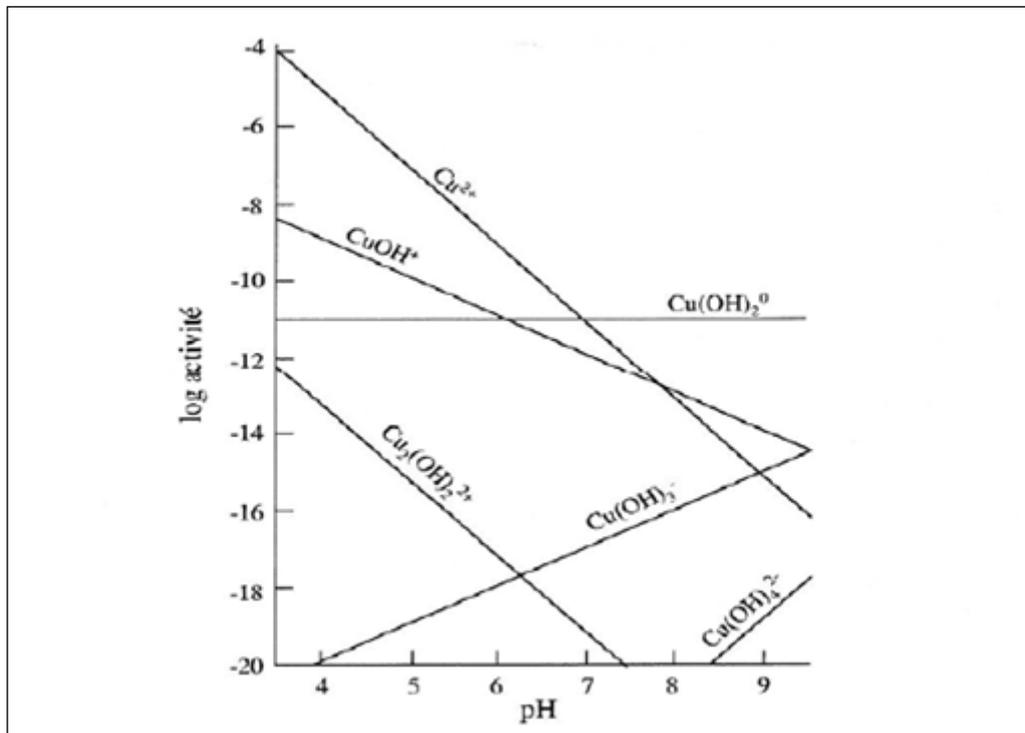


Figure 6 : Spéciation du cuivre en équilibre avec le cuivre du sol en fonction de pH (Lindsay, 1979)

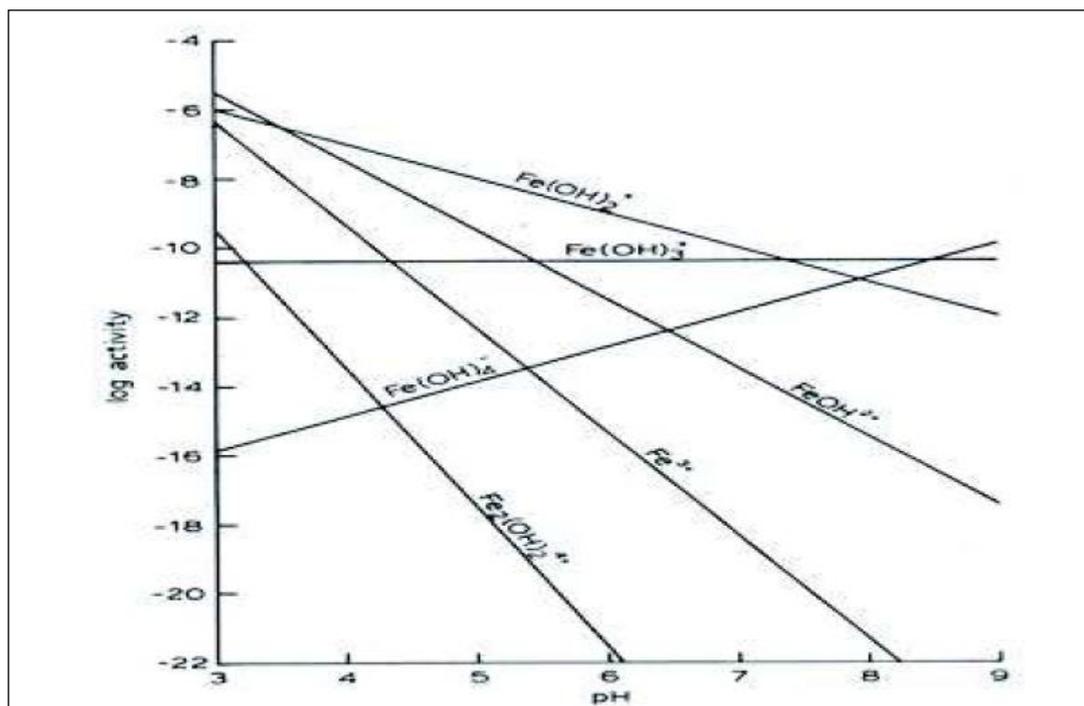


Figure 7 : Différentes formes du fer selon le pH (Lindsay, 1979)

Les figures 6 et 7 montrent les différentes formes du cuivre et du fer selon la valeur du pH.

## 2.2. Effet cationique /CEC

La capacité d'échange cationique se définit comme la capacité d'un constituant solide à adsorber des cations dissous et à libérer une quantité équivalente d'anions dans le milieu (Dubé, 1997). Il

est reconnu que les minéraux argileux, ainsi que la matière organique représentent les surfaces d'adsorption possédant les CEC les plus élevés, soit entre 150 et 300 méq/100g contre 60 méq/100g pour un sol dit minéral (Alloway, 1990). Elle résulte de forces d'attraction électrostatique entre les ions, dont les cations en solution chargés positivement sont attirés par des forces électrostatiques de type Van Der Waals ou coulombiennes, vers les charges négatives de la surface des particules du sol telles que les particules argileuses, les oxydes et les substances humiques (Hatira et *al.*, 1990).

### **2.3.Teneur en matière organique**

La matière organique est une source riche de charges négatives et peut donc, apporter une contribution significative à la CEC d'un sol. La CEC d'un sol organique varie de l'ordre de 100-300-mol/kg, en fonction de sa nature et sa composition (Brady et *al.*, 1990).

Elle joue donc, un rôle important dans la rétention des oligoéléments. Ainsi au cours de la décomposition, il constitue une source lente mais continue d'éléments nutritifs, y compris les oligoéléments (Stevenson et *al.*, 1982). Elle peut être divisée en 4 ensembles principaux ; les organismes vivants, la matière organique fraîche, les composés humiques et les associations organo-minérales et les composés organiques dissouts dans la solution aqueuse. (Geoffry Lespagnol, 2003).

Les groupes fonctionnels susceptibles de réagir avec les ions métalliques par échange ionique, adsorption de surface ou chélation sont les groupes : amine, carboxyle, carbonyle, phénol, thiol et quinone. La MO peut réduire la biodisponibilité du cuivre par la formation de complexes métaux/ligands organiques (Tom-Petersen et *al.*, 2001).

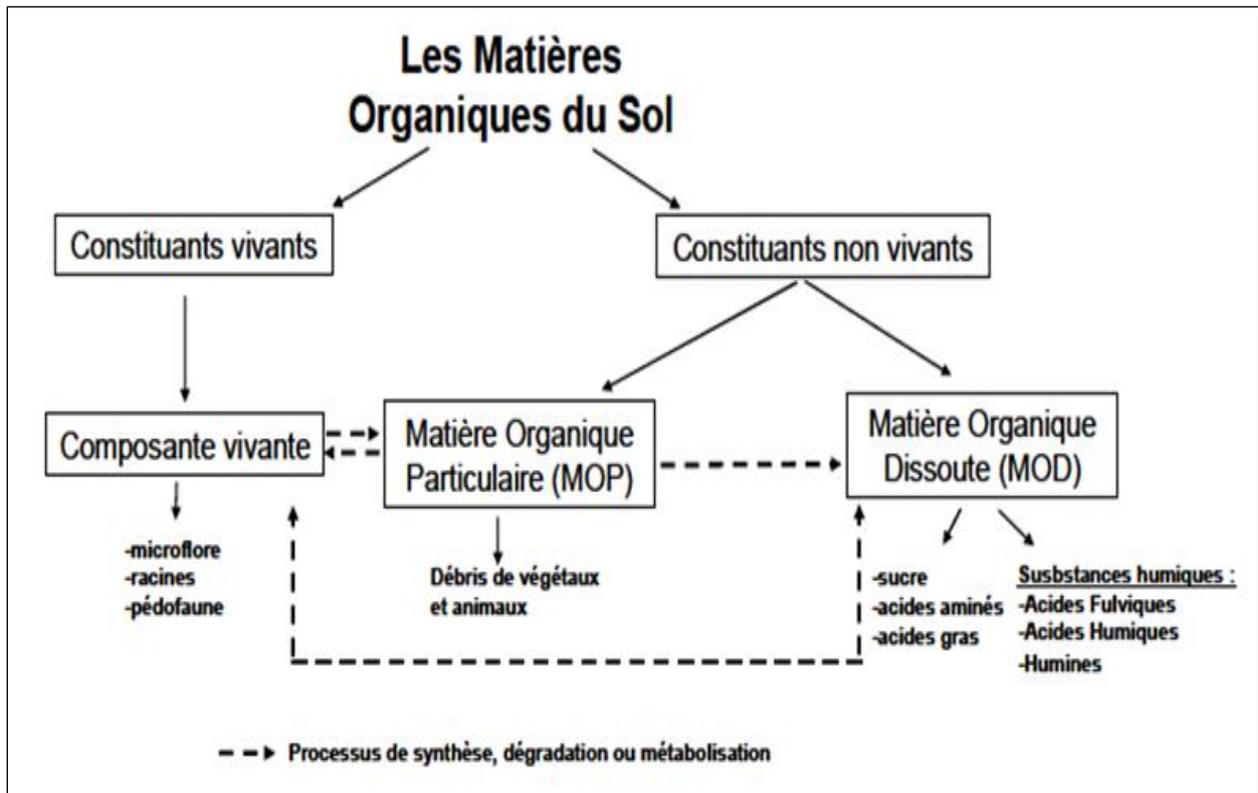


Figure 8 : Constituants de la matière organique des sols adaptés de Sebastia *et al.*, (2007)

#### 2.4. Condition d'oxydoréduction du milieu

Le potentiel redox des sols peut, dans certains cas, agir directement sur la mobilité des oligoéléments métalliques, en modifiant leur état d'oxydation, ou l'affecter indirectement en modifiant la solubilité d'oxydes minéraux capables de retenir les métaux. (Hlavackova, 2005).

Le degré d'aération du sol est déterminé par les pratiques culturales (irrigation, tassement par passages répétés d'engin, apport de matière organique biodégradable) consommatrice d'oxygène et par les événements climatiques (précipitations massives entraînant des conditions d'hydromorphie).

L'ensemble de ces facteurs favorise l'anoxie, modifiant ainsi, la mobilité de certains oligoéléments, dont les formes réduites sont plus mobiles dans les sols que les formes oxydées (Förstner, 1985).

**Tableau 8 : Effets du potentiel redox sur la mobilité des oligoéléments dans le sol (FRSTNER, 1985)**

| Mobilité relative | Potentiel redox |           |
|-------------------|-----------------|-----------|
|                   | Oxydant         | Réducteur |
| Très haute        | B               | ---       |
| Haute             | Mo              | ---       |
| Moyennes          | Cu              | Mn        |
| Basse             |                 | Fe, Zn,   |
| Très basse        | Fe, Mn          | Cu, B, Mo |

## 2.5. Température/ Humidité

Le taux d'humidité du sol conditionne la circulation d'eau et donc, le transfert possible des éléments dans la solution du sol.

La température du sol peut également agir directement ou indirectement sur la mobilité des métaux (Cornu et *al.*, 2008). L'augmentation de la température agit directement sur la dissolution de substances fixant les oligoéléments facilitant ainsi leur libération dans la solution du sol (Loué, 1993).

## 2.6. Nature du sol

### 2.6.1. Généralité

Le sol est le produit d'altération des roches et des sédiments en interaction avec l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère. C'est une interface d'épaisseur variable allant d'une dizaine de centimètres à plusieurs dizaines de mètres (Lespagnol, 2003).

Dans les sols en général apparaît le phénomène de leur enrichissement en oligo-éléments par des apports anthropogènes (Védy et Clément, 1994).

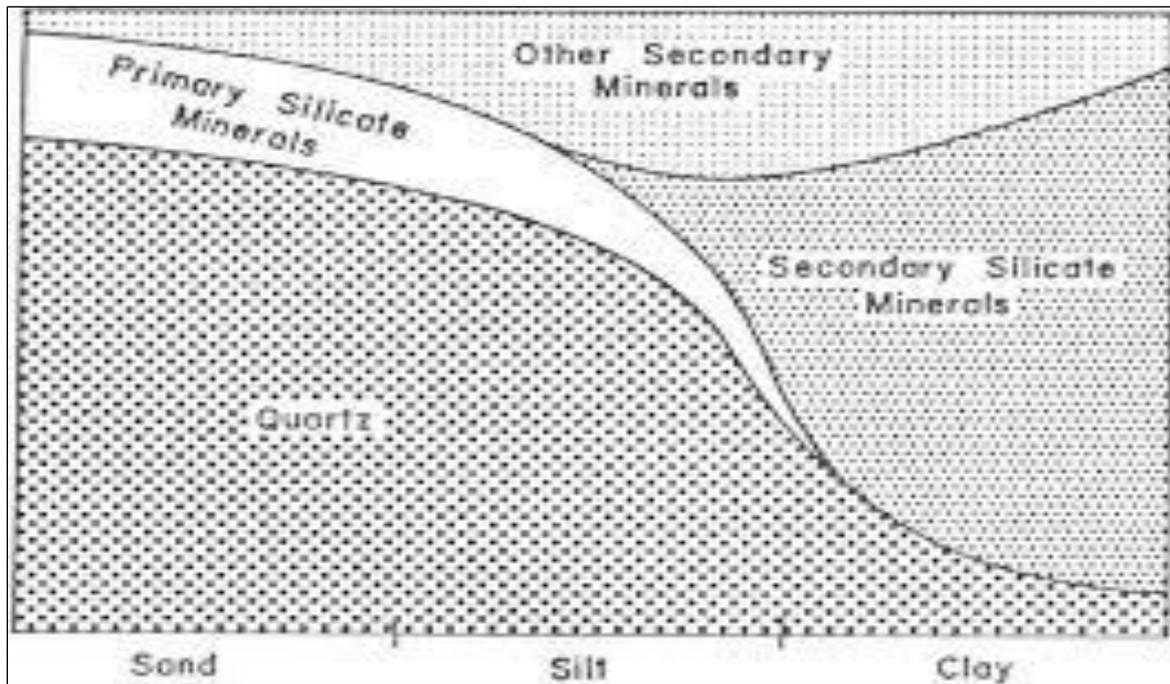


Figure 9 : Nature minéralogiques (Ruellan, 1993)

### 2.6.2. Constituants du sol

#### ➤ Minéraux

La texture du sol est l'un des facteurs important qui jouent un rôle essentiel dans la rétention des oligo-éléments ou de leur libération. En général, les sols à texture grossière présentent une tendance plus faible pour la sorption d'oligo-élément que les sols à texture fine, (Dekki, 2012).

Tableau 9 : Classification granulométrique de Wentworth (Blott et Pye, 2001)

| Classe granulométrique | Diamètre      |
|------------------------|---------------|
| Sable grossier         | 2000 - 250 um |
| Sable fin              | 250 - 63 um   |
| Limon grossier         | 63 - 20 um    |
| Limon fin              | 20 - 2 um     |
| Argile                 | <2um          |

La fraction des sols à grains fins contient des particules caractérisées par une grande réactivité et une large surface de sorption, telles que les minéraux d'argile, les oxy-hydroxydes de manganèse et de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et des acides humiques (Bradl, 2004). Les minéraux argileux sont une source importante de charges négatives dans le sol et contribuent fortement à la capacité d'échange cationique (Gounou, 2008). Ils constituent donc, une importante phase solide pour retenir les ions chargés positivement par sorption électrostatique. En plus de la quantité, le type de minéral argileux est d'une grande importance. Par exemple, la montmorillonite est caractérisée par une CEC très élevée, entre 80 et 100 cmol/kg, l'illite présente une CEC moyenne, entre 15 et 40

cmol/kg tandis que la kaolinite a une CEC relativement faible entre 3 et 15 cmol/kg (Brady et Well, 1990).

Globalement, les particules d'argile sont des minéraux de silicate chargées négativement et des ions chargés positivement sont donc préférentiellement fixés. Cependant, il a été rapporté que le bore est efficacement adsorbé sur les minéraux argileux par échange de ligand, et il est très peu soumis à un échange d'anions. Ils peuvent néanmoins jouer un rôle sur la structure, la perméabilité et fournir une réserve d'éléments réactifs dans les sols (Duchaufour, 1995).

#### ➤ **Teneurs en carbonates**

La présence de  $\text{CaCO}_3$  libre augmente le pH du sol et par conséquent, réduit la solubilité des oligo-éléments (Jenne, 1968), et les ions de carbonate / bicarbonate forment des composés de carbonates et de métaux qui peuvent être précipités, ou qui sont peu solubles.

#### ➤ **Argiles**

Les argiles sont des phyllo-silicates alumineux. La propriété importante des argiles à considérer est leur charge de surface globalement négative. Cette charge est principalement, due à des substitutions isomorphiques de certains cations constitutifs de la structure des minéraux argileux mais aussi, dans des proportions moindres, aux groupements hydroxyles situés aux bords des feuillets. (Lespagnol, 2003) Grâce aux propriétés chimiques de l'argile, il peut donc être incorporé de façon préférentielle aux cations majeurs, moins réactifs à la complexation, tels que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , ou  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ , qui n'ont aucun pouvoir complexant.

## **V. Méthodologies d'évaluation du comportement des oligo-éléments**

### **1. Mesure oblique de la mobilité des oligo-éléments dans les sols en place**

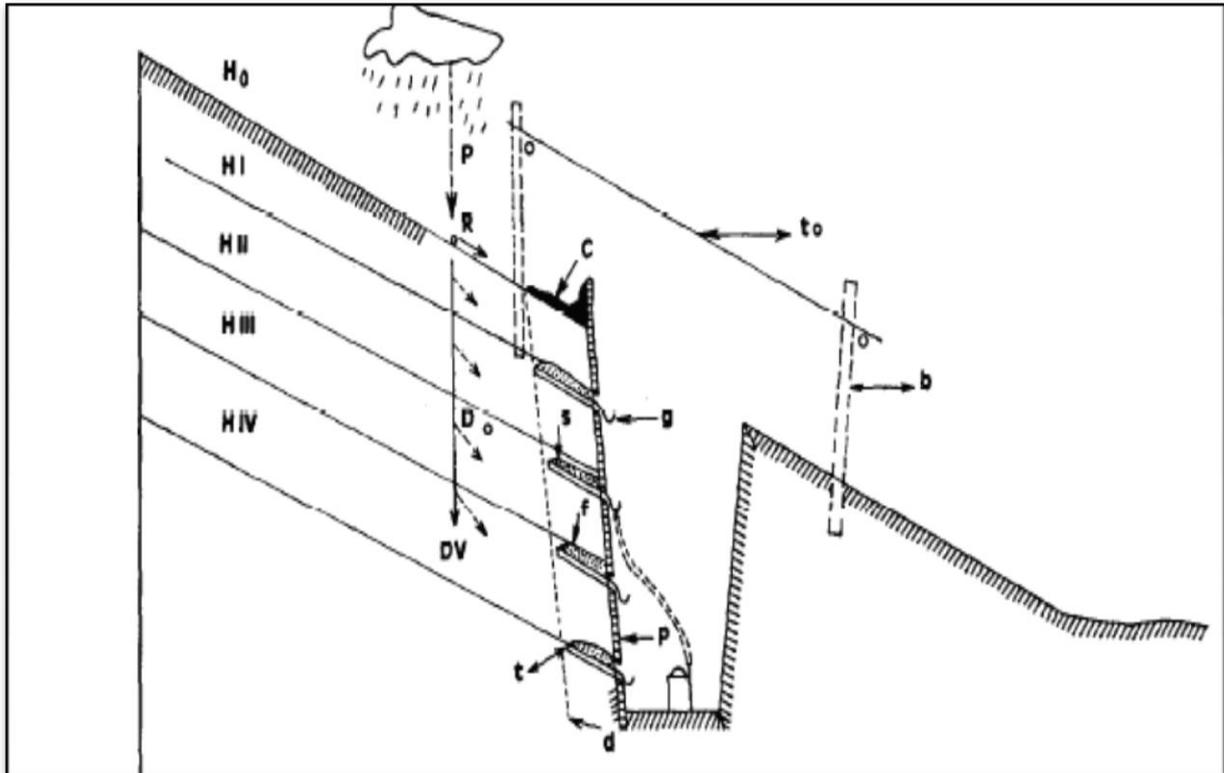
Trois conditions sont nécessaires pour permettre un mouvement oblique des eaux de gravité dans le sol :

- Des pluies importantes et intenses ;
- Un sol perméable en surface et comportant un horizon moins perméable en profondeur ;
- Une surface en pente. (Roose, 1968).

Selon Roose (1968), cette méthode permet de réaliser une approche qualitative, et dans certains cas quantitatif, des phénomènes consécutifs aux mouvements obliques des eaux de gravité à la surface et dans les différents horizons du sol.

Cette méthode peut ouvrir des perspectives intéressantes sur la pédogenèse de certains types de sol. Et sur le lessivage et l'entraînement par l'eau des éléments minéraux, sous forme soluble ou pseudo-soluble (Roose, 1968).

De plus, les eaux recueillies sous les différents horizons du sol reflètent plus ou moins fidèlement l'état des solutions du sol à ces niveaux. Il est donc, possible d'en tirer des renseignements précieux sur la migration des différentes formes d'engrais, sous l'effet des eaux d'irrigation et de drainage. En s'appuyant sur un bilan hydrique,(Roose, 1968).



**Figure 10 : Schéma des mouvements de l'eau de gravité dans le sol (E.J.Roose, 1968)**

P : pluie ;R :ruissellement ;DV :drainage verticale ; DO :drainage oblique ;H : horizon pédologiques ; C : canal de ruissellement ; g :gouttière ; t :tôle ; f :fente ; s :sable lavé ;d :tranche de sol protégée ;b : bâti qui soutient le toit ;p :planches de soutènement

## 2. Evaluation en batch

Les expériences en batch sont largement utilisées dans le domaine des études des sols. Elles servent à déterminer les caractéristiques physico-chimiques du sol comme le pH, la CEC, le pouvoir tampon, etc. (Tan, 1993). Ils sont également utilisés pour étudier le comportement des éléments (inorganiques et organiques) dans les sols afin de déterminer les facteurs qui contrôlent les équilibres de leur fixation (Agbenin et *al.*, 2004).

Pendant les dernières décennies, la méthodologie en batch a été souvent employée pour la mise en œuvre de différents tests de lixiviation et d'extraction qui ont pour but d'évaluer l'extractibilité et la spéciation de polluants dans les sols (Schramel et *al.*, 2000).

Le principe des expériences en batch est la mise en contact d'une phase solide avec une phase liquide dans un réacteur, sous agitation et pendant un temps de contact suffisamment long pour atteindre l'équilibre. Par ailleurs, la température du système est souvent suivie et considérée constante (Roose, 1968).

Parmi les avantages des expériences ; la facilité de leur mise en œuvre, leur rapidité et leur coût relativement faible. Par contre, l'hydraulique du système étant très loin des conditions réelles du sol apparaît comme un grand inconvénient.

### **3. Evaluation en continue**

Par opposition au réacteur fermé, le modèle expérimental de type colonne permet d'étudier le comportement des oligo-éléments dans les sols en contact avec une phase liquide en écoulement, et en fonction de plusieurs variables à l'entrée du système comme le pH, la concentration en ligands, la température, la force ionique, la masse solide, etc. (Marcos, 2001). Il s'apparente aux techniques de chromatographie liquide-solide (Sigg et *al.*, 1992).

Dans les expériences en continu, l'échantillon de sol est placé dans la colonne en position verticale. La solution percole entre ou à travers les particules solides, puis elle est collectée et analysée. L'introduction d'un écoulement a pour objectif d'étudier la migration des éléments en considérant les paramètres hydrauliques du sol (Sardin, 1997). L'approche dynamique peut être utilisée pour évaluer la capacité de rétention, mais elle permet également d'étudier la lixiviation des éléments fixés (Sardin, 1997). Dans le 2<sup>ème</sup> cas La lixiviation a pour but d'évaluer la stabilité des éléments minéraux notamment des polluants initialement fixés dans le sol (Kedziorek et *al.*, 1998).

## **VI. Méthodes d'extraction des oligo-éléments au niveau du sol**

Les méthodes d'extraction chimique ont évolué vers l'utilisation de solutions, de moins en moins agressives vis-à-vis du sol. Ces extractions sont parfois qualifiées de douces, ou de ménagées.

### **1. Extraction du Mn, Fe, Cu et Zn**

La détermination des teneurs en métaux et métalloïdes extractibles et facilement échangeables est effectuée par des extractions chimiques simples avec différents réactifs, dont quatre types ;

des complexants organiques (chélates) sont couramment utilisés pour estimer non seulement la fraction échangeable des métaux, mais aussi la fraction complexée par la matière organique et la fraction fixée sur les hydroxydes de fer, de manganèse et d'aluminium (Harmsen, 2007).

Le DTPA possède un pouvoir d'extraction plus faible que celui de l'EDTA mais plus fort que celui des solutions salines (Gupta et Aten, 1993). Contrairement à ces dernières, le DTPA serait capable de solubiliser une partie des éléments fixés sur les oxydes de manganèse (Shuman, 1988). L'EDTA et le DTPA sont les complexants principalement utilisés. L'utilisation d'EDTA a été choisie selon la norme destinée à estimer la quantité des éléments traces métalliques biodisponibles dans le sol. Cependant, les quantités extraites se révèlent souvent élevées et peu corrélées aux teneurs réellement biodisponibles (Gupta et Aten, 1993).

En effet, le test le plus couramment adopté dans de nombreux pays est celui au DTPA (acide diéthylènetriamine penta acétique), mise au point par Lindsay et Norvell (1977), qui consiste à un réactif d'extraction composé de DTPA 0.005 M,  $\text{CaCl}_2$  0.01 et tri-éthanol-amine 0.1 M comme tampon à  $\text{pH} = 7.3$ .

## **2. Extraction à l'eau bouillante du bore**

Des méthodes d'extraction ont été largement examinées par Bingham, (1982) pour déterminer le bore disponible à partir du sol. L'agent d'extraction le plus courant est l'eau chaude, car le Bore de la solution du sol, est le plus important en ce qui concerne l'absorption des plantes. Le Bore est alors déterminé dans les filtrats par un procédé colorimétrique carmin ou par une procédure d'azométhine-H.

**Tableau 10 : Méthodes d'extraction ménagées des éléments en trace du sol normalisées à la normalisation en Europe**

| <b>Pays</b>        | <b>Méthode</b>  | <b>Objectif</b>  | <b>Référence</b> |
|--------------------|---|--|------------------|
| <b>Allemagne</b>   | $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 1.mol.L <sup>-1</sup>  | Détermination des éléments en traces mobiles   | Din, 1993        |
| <b>France</b>      | $\text{Na}_2$ EDTA 0.01 mol.L <sup>-1</sup> + $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ mol/L, pH=7.3     | Evaluation des teneurs assimilables en Cu,Zn,Fe et Mn pour des sols de Ph acide                            | Afnor, 1994      |
| <b>Italie</b>      | EDTA 0.02 mol.L <sup>-1</sup> + $\text{CH}_3\text{COOCH}_3$ 0.5mol.L <sup>-1</sup> , Ph=7.3 | Evaluation de la biodisponibilité de Cu,Zn,Fe et Mn pour des sols de pH neutre et basique                  | Unichim, 1991    |
| <b>Pays bas</b>    | $\text{CaCl}_2$ 0.01 mol.L <sup>-1</sup>  | Evaluation de la biodisponibilité et de la mobilité des métaux lourds de sol pollués                       | Houba et al 1990 |
| <b>Suisse</b>      | $\text{NaNO}_3$ 0.1mol.L <sup>-1</sup>  | Détermination de la teneur soluble en métaux (Cu,Zn,Cd,Pb et Ni et évaluation des risques d'écotoxicologue | VSB0, 1986       |
| <b>Royaume uni</b> | EDTA 0.05 mol.L <sup>-1</sup> pH=4  | Evaluation de la biodisponibilité de Cu  | Maff, 1981       |

## VII. Normes internationales d'interprétation des analyses

L'interprétation des résultats d'analyses du sol en termes d'oligoéléments, doit prendre en compte, un grand nombre de facteurs, tels que les caractéristiques physico-chimiques du sol et les pratiques agricoles.

Dans le cas des sols calcaires, le pH élevé réduit la solubilité et la biodisponibilité des oligoéléments à l'exception du molybdène (Mo), car sa disponibilité augmente avec le pH. (Dekki, 2012).

Les normes d'interprétation des analyses des oligoéléments dans le sol sont présentées par Alloway (2008) dans le tableau 11.

**Tableau 11 : Normes d'interprétations d'analyse du sol (mg/kg) ( Alloway, 2008)**

| Oligoélément  | Test du sol | Faible | Marge    | Adéquate |
|---------------|-------------|--------|----------|----------|
| <b>Bore</b>   | Eau chaude  | <0.5   | --       | >0.5     |
|               | HCL         | <0.45  | --       | >0.45    |
| <b>Zinc</b>   | DTPA        | <0.5   | 0.5 -1   | >1       |
| <b>Cuivre</b> | DTPA        | <0.2   | 0.2- 0.5 | >0.5     |
|               | AB-DTPA     | <0.2   |          | >0.5     |
| <b>Fer</b>    | DTPA        | <4.5   | ---      | >4.5     |
|               | AB-DTPA     | <2     | 2.1-4    | >4       |
| <b>Mn</b>     | DTPA        | <1.0   | 1.0-2.0  | >2       |
|               | AB-DTPA     | <1.8   |          | >1.8     |

### VIII. Synthèse des travaux expérimentaux sur la mobilité

Dans les sols cultivés, la connaissance de la mobilité des oligo-éléments dans le sol, est importante pour comprendre le fonctionnement des éléments traces dans les sols, et définir leurs distributions et comportements. En 1974, Singh a étudié la mobilité du zinc, dans des colonnes en plastique de 11 cm de diamètre et de 35 cm de longueur ont été uniformément emballées à 30 cm de profondeur avec deux sols différents et soumis à la percolation avec différentes quantités de précipitations simulées après l'ajout de  $ZnSO_4$  marqué avec Zn 65 à la surface de chaque colonne de sol, et il a rapporté dans son travail que le zinc ait été retenue par les 3 cm supérieurs du sol, et que le Zn s'est déplacé à une profondeur de 12 cm dans le premier et de 18 cm dans le sol deuxième lors de la lixiviation à la fin de cette étude Singh, 1974 a signalé que le mouvement du Zn à travers les sols ne dépend pas seulement de CEC, mais aussi sur d'autres facteurs tels que le débit d'eau, le pH, le Zn initial contenu et migration d'autres fractions de sols.

Dans la même année Singh a étudié la mobilité du manganèse. Lorsque le  $MnSO_4$  a été lessivé avec de la pluie eau équivalent à 300 mm de précipitation, Singh, 1974, Mn déplacé à une profondeur de 18 cm sol A et dans tout le sol B, mais une concentration plus élevée de Mn a été retenu par les 3 cm supérieurs du sol. Avec de l'eau équivalente à 1200 mm de précipitations. Avec lixiviation alternée et séchage, la profondeur de pénétration de Mn a augmenté à 24 cm dans le sol A, et des quantités relativement plus élevées de Mn se sont déplacées à des profondeurs inférieures à 15 cm dans le sol B. Le pourcentage de CEC occupé par Mn dans les 3 cm supérieurs en moyenne 24 et 5% dans les sols A et B lorsque Mn a été appliqué seul. Ce a diminué à 11% dans le sol A et est resté inchangé dans le sol B lorsque Mn était appliqué en combinaison avec Zn. Ca et Mg échangeables étaient les plus bas dans le supérieure 3 cm, puis

augmenté à une profondeur de 6 à 9 cm, devenant presque uniforme plus bas dans les deux sols. Le mouvement de Mn dans le sol dépend non seulement de CEC et la teneur en argile, mais implique également d'autres facteurs tels que le débit d'eau, pH, migration des fractions argileuses et conditions de réduction de l'oxydation.

En 2003, Colinet s a travaillé sur la mobilité le Zn, et, le Cu dans le but de déterminer leur distribution spatiale en région limoneuse, et a déterminé que la distribution de ces deux éléments dépend des conditions physico-chimiques qui dominent dans la région. Ce résultat a été confirmé par d'autres auteurs. G.C.Chen *et al.*, (2006) ont lancé une étude qui a été menée pour examiner l'étendue de la lixiviation de Zn, et de Cu, cette expérimentation a montré que leur mobilité est favorisé par  $\text{pH} < 7$ , alors que le  $\text{pH} > 7$  favorise leur précipitation.

Au Maroc, peu d'étude ont été effectués sur l'étude de la mobilité des oligo-éléments, en effet deux études ont été lancées ces dernières années. Drissi, (2016) a étudié l'effet de différentes quantités de lessivage sur le mouvement descendant du zinc appliqué, en tant qu'engrais, sur la surface d'un sol sablonneux au niveau des pots en polyéthylène. Ces résultats ont montré l'absence de zinc dans le lixiviat pour toutes les quantités de lixiviation, et ont révélé que le Zn se trouve accumulé dans la couche supérieure du sol (0-10 cm). Er-rezza,(2017) a évalué l'effet de lessivage sur la mobilité de quatre oligoéléments ; le Fer (Fe), le Cuivre (Cu), le Manganèse (Mn) et le Bore (B), appliqués comme engrais, au niveau du sol sablonneux du Loukkos et au niveau du sol limono-argileux du Gharb, l'expérience a été menée dans des colonnes en PVC Au niveau du sol sablonneux, les résultats ont montré que le B est fortement mobile, en revanche, le Fe s'est accumulé au niveau du deuxième horizon (10-20cm) et le Mn s'est accumulé au niveau du troisième horizon du sol (20-30cm). Concernant le Cu, sa plus haute concentration a été enregistrée au niveau du premier horizon (0-10cm) alors que au niveau du limono-argileux, le Cu, Fe et le Mn sont considérés peu mobiles Pour le B, les résultats montre une légère mobilité le long du profil du sol.

# MATERIEL ET METHODES

---

## I. Présentation du site expérimental

### 1. Situation géographique

L'étude effectuée, dans le cadre du projet de fin d'étude de la FST de Fés a eu lieu au niveau de la province de Sefrou, au Domaine agricole Louata relevant de la Providence verte. Le domaine se situe au Nord-Est du Moyen Atlas, à une altitude variant de 400 à 770 m, limité au Nord par le Barrage Allal El Fassi, à 18 km de la ville de Séfrou et à 45 km de la ville de Fès. Il couvre une superficie de 3227 ha, dont 393,91 ha sont occupés par l'arboriculture fruitière et 2348,8 ha sont réservés aux grandes cultures.

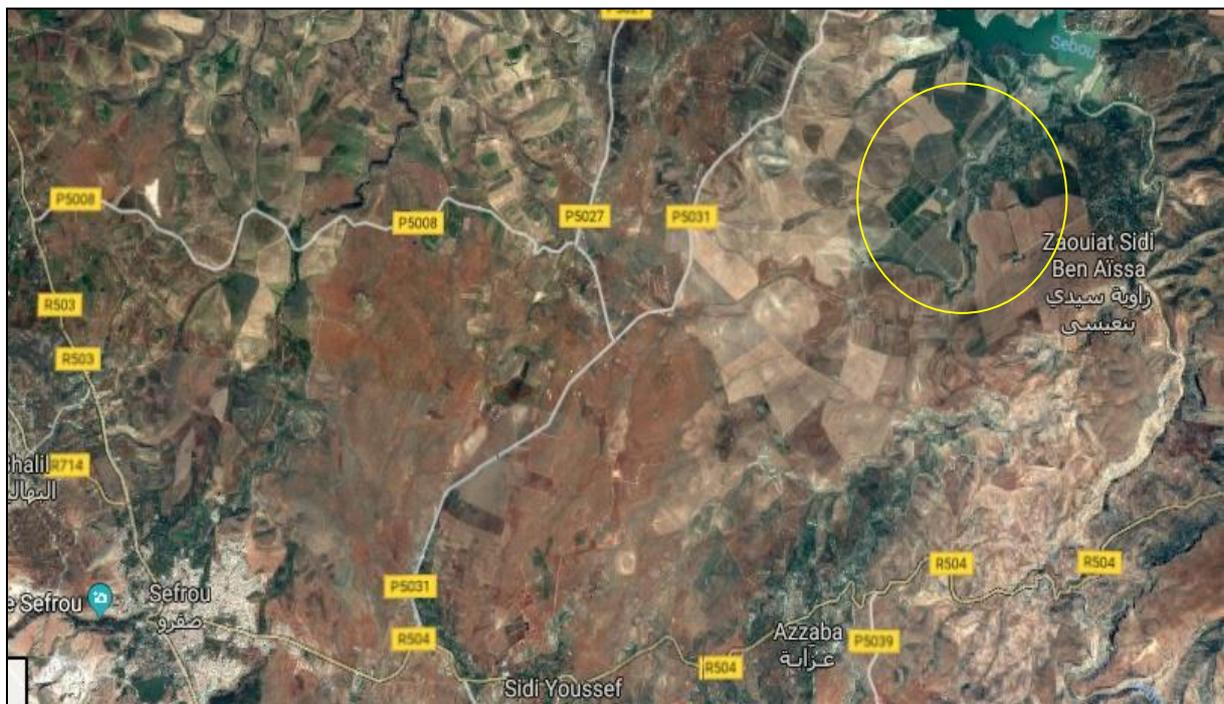
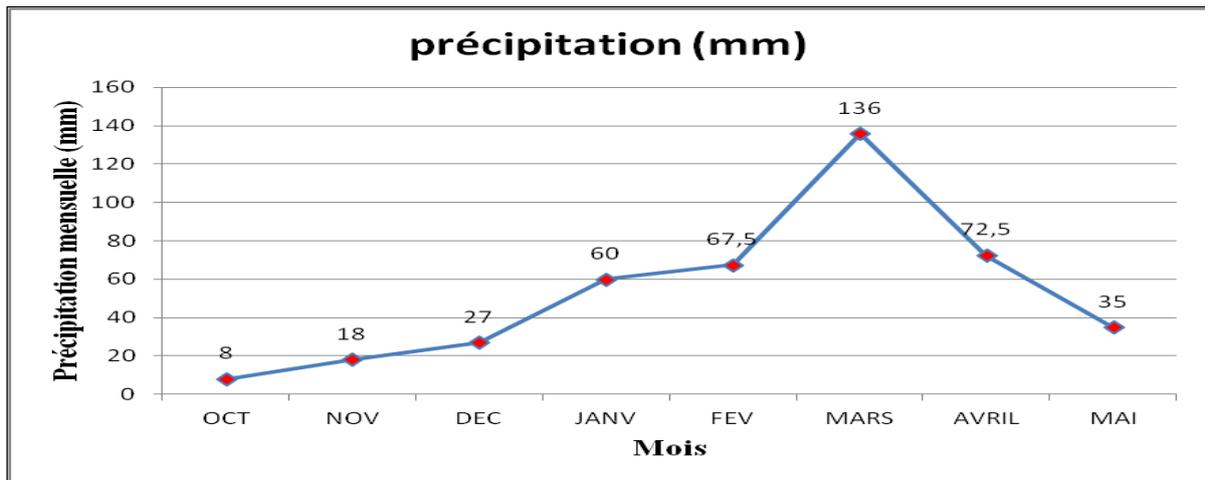


Figure 11 : Localisation géographique du Domaine Louata ; (Source: google maps)

### 2. Contexte climatique

Le climat dominant dans cette région est le semi-aride, qui se caractérise par un été chaud et des hivers particulièrement doux et froids. Cette zone est de temps en temps sujette à des aléas climatiques.

## 2.1. Pluviométrie

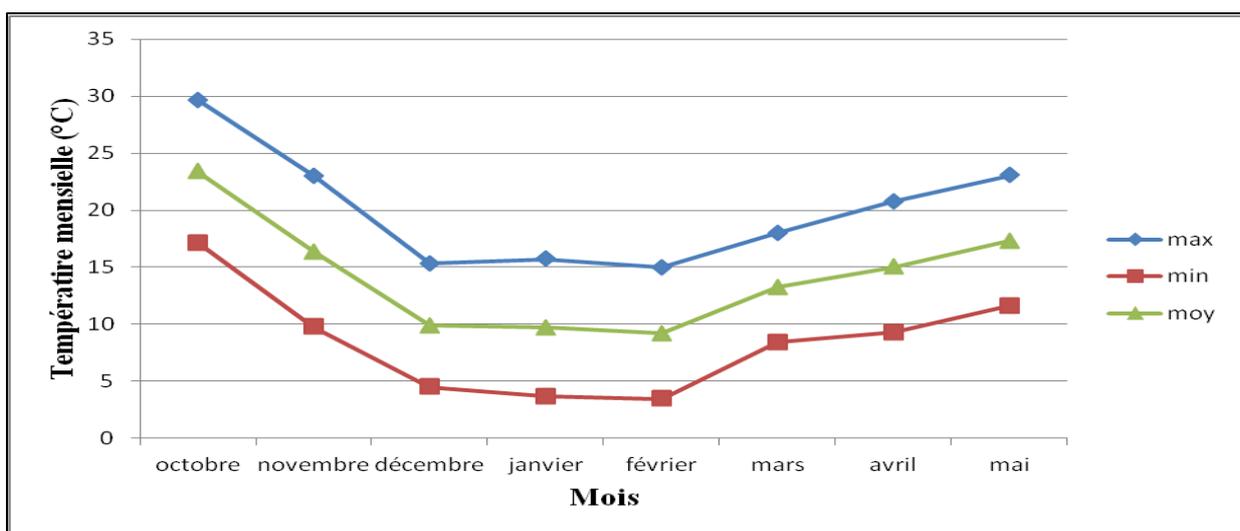


**Figure 12 : Précipitation mensuelles moyennes couvrant la période allant d'octobre à mai (Source: Providence verte, Domaine Louata 2017/2018)**

La pluviométrie cumulée de la campagne (2017/2018) dans la région de Sefrou est de 424mm, dont on remarque que la pluviométrie la plus élevée est enregistrée en mars (136mm), alors que la plus basse a été notée pendant octobre et novembre.

## 2.2. Températures

La figure 13 montre le diagramme des températures minimales, maximales et moyennes mensuelles collectées de la station météo di domaine, le mois le plus chaud est octobre avec une température moyennes de 23,40°C, alors que le mois le plus froid est celui de février avec une température moyennes de 9,21°C.



**Figure 13 : Evolution des températures moyenne, maximale et minimale durant la campagne agricole 2017/2018 (Source : Providence verte, Domaine Louata 2017/2018)**

## II. Présentation des essais

L'évaluation des comportements, des distributions et donc de la mobilité des oligo-éléments dans le milieu sera tout d'abord étudié dans les expériences en colonne PVC. Avec une phase solide stationnaire (le sol) et une phase liquide mobile (eau distillée).

Dans une deuxième partie, les expériences réalisées dans des lysimètres seront présentées. Ces lysimètres nous permettront d'analyser le comportement des oligo-éléments sur place dans le champ.

Nous avons limité notre étude au cas du sol saturé pour lequel les phases solide et liquide sont appréhendées. La phase gazeuse et l'activité biologique dans le sol ne sont pas considérées dans le cadre de notre travail.

Les oligo-éléments étudiés sont : le Cuivre, le Zinc, Manganèse, Bore, et le Fer. Ces derniers sont largement utilisés dans l'agriculture, et dont le comportement est différent dans les sols.

### 1. Essai en colonne PVC

#### 1.1. Caractéristiques du sol étudié

##### 1.1.1. Site de prélèvement

Les échantillons du sol de la couche arable de 30 cm de profondeur, ont été prélevés dans la province de Sefrou ( $33^{\circ}47'59''\text{N}/4^{\circ}40'48''\text{W}$ ), et plus précisément, au niveau des parcelles du domaine agricole Louata (Providence vert).

##### 1.1.2. Analyse du sol

Le but de cette analyse est la détermination des caractéristiques physico-chimiques du sol étudié.

#### 1.2. Caractéristiques physico-chimiques du sol

##### 1.2.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique a pour but de caractériser la distribution de tailles des particules du sol. En effet, la taille des particules a une influence sur de nombreuses caractéristiques du sol et donc sur le comportement des oligo-éléments.

**Tableau 12 : Composition granulométrique du sol étudié (LABOMAG, 2018)**

| Argile (%) | Limon fin (%) | Limon grossier (%) | Sable fin (%) | Sable grossier (%) |
|------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
| 47,5       | 15,5          | 8,3                | 21,2          | 7,8                |

Les résultats obtenus nous montrent que le sol étudié a une texture très argileuse. Le sol contient un taux d'argile total de 47,5 %. Le taux de limon total est de 23,8 % tandis que le taux de sable est de 29 % (Tableau 12).

### 1.2.2. Teneur totales des composants du sol

**Tableau 13 : Caractéristiques chimique du sol étudié (LABOMAG, 2018)**

| Elément                             | Quantité |
|-------------------------------------|----------|
| Calcaire total %                    | 14.6     |
| Calcaire actif %                    | 6.7      |
| CaO (ppm)                           | 11130    |
| P (P2O5 Olsen) (ppm)                | 45       |
| K2O (ppm)                           | 654      |
| MgO (ppm)                           | 533      |
| Cu <i>extr. DTPA</i> (ppm)          | 1.82     |
| Mn <i>extr. DTPA</i> (ppm)          | 25.68    |
| Fe <i>extr. DTPA</i> (ppm)          | 4.4      |
| Zn <i>extr. DTPA</i> (ppm)          | 0.41     |
| B <i>extr. Eau bouillante</i> (ppm) | 0.44     |
| Ec (ms/cm)                          | 0.18     |
| CEC (méq/100g)                      | 29.3     |
| pH                                  | 8,6      |
| Matière organique %                 | 3,53     |

L'analyse chimique du sol montre qu'il s'agit d'un sol très calcaire 14,6% (calcaire totale), riche en magnésium, et très riche en phosphore et en potassium. Le sol est riche en cuivre 1.82ppm et en manganèse 25,68 ppm.

En outre, le sol se caractérise par une forte capacité d'échange cationique 29,3% (tableau 13). Les analyses du sol ont montré que le pH du sol est très élevé avec une valeur de 8,9. Le sol étudié est très riche en matière organique celle-ci représente 3,5 %.

### **1.3. Mise en place et conduite de l'essai**

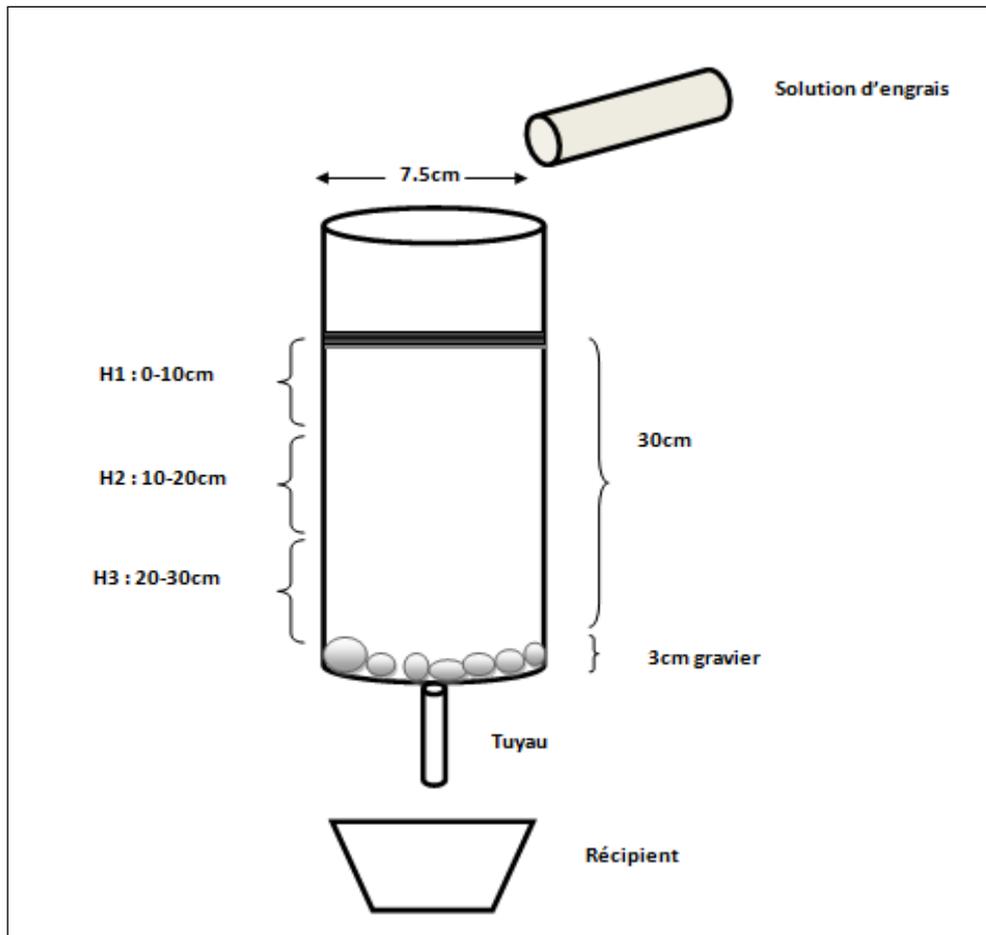
#### ***1.3.1. Installation des colonnes de lessivage / apport d'oligo-éléments***

L'étude a été réalisée dans des colonnes en PVC (40 cm de longueur, 7.5 cm de diamètre extérieur et de 7.04 cm de diamètre intérieur). Vu la densité apparente du sol, les colonnes sont remplies de 1.22 kg, cette masse est utilisée pour remplir la colonne afin d'obtenir la hauteur de 30cm.

Le remplissage de la colonne se fait en deux parties. Une Quantité de 0,130 g du gravier est introduite dans la colonne, puis une quantité de 1,22kg du sol tamisé et mélangé, est introduite et tassée. Le remplissage de la colonne se fait en couches minces successives. Ensuite le sol est saturé par de l'eau distillée, Le processus est répété pour chaque essai.

Un système de drainage a été mis en place. Au-dessous des colonnes, des récipients ont été placés, chaque colonne est alimentée en ascendant par les apports d'eau distillée, récupéré en sortie de cette dernière. Les colonnes sont déposées sur des supports métalliques, afin de garder leur stabilité au cours de l'expérimentation.

La mise au point d'une méthodologie performante de remplissage et de saturation des colonnes est essentielle. Parmi les objectifs à atteindre il y a : l'homogénéité du milieu et de l'écoulement dans la colonne.



**Figure 14 : Représentation schématique du protocole expérimental adopté pour l'essai en colonne PVC**

H1: Horizon 1; H2: Horizon 2; H3: Horizon 3

Au niveau du sol du Domaine Louata, 3 essais de lessivage ont été effectués en colonnes afin d'évaluer la mobilité des 5 éléments dans le sol argileux-calcaire.

Essai1 : Lessivage du bore, apporté à la surface du sol, sous forme de  $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (solubore) ;

Essai2 : Lessivage de Cuivre apporté à la surface du sol, sous forme sulfate de cuivre ;

Essai3 : Lessivage d'un mélange des cinq oligoéléments (Fe, Cu, Mn, B, et Zn) apporté ;

Après avoir saturé le sol par l'eau distillée, les oligo-éléments à étudier ont été apportés sous forme d'engrais à la surface du sol de chaque colonne, le tableau (14) représente les quantités d'oligoéléments apportées, ainsi que leur forme chimique.

**Tableau 14 : Forme et quantité apportée d'oligo-éléments**

| <b>Elément</b> | <b>Forme chimique</b> | <b>Teneur de l'élément (%)</b> | <b>Quantité apportée (ppm)</b> |
|----------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Fe             | Fe-EDDHA              | 6%                             | 1.2                            |
| B              | Solubore              | 21%                            | 0.5                            |
| Cu             | Sulfate de cuivre     | 25%                            | 0.6                            |
| Zn             | Sulfate de zinc       | 22.5%                          | 5                              |
| Mn             | Sulfate de manganèse  | 32%                            | 5                              |

### *1.3.2. Traitements étudiés : Doses de lessivage testées*

L'eau distillée a été utilisée pour les apports, 3 doses de lessivage ont été testées : 35 mm, 70 mm et 140 mm. Ces doses ont été déterminées à partir d'une analyse fréquentielle des quantités annuelles lessivées, au-delà de 30cm, sur 30 ans (de 1988 à 2017). Les trois doses ont été fractionnées en dix jours.

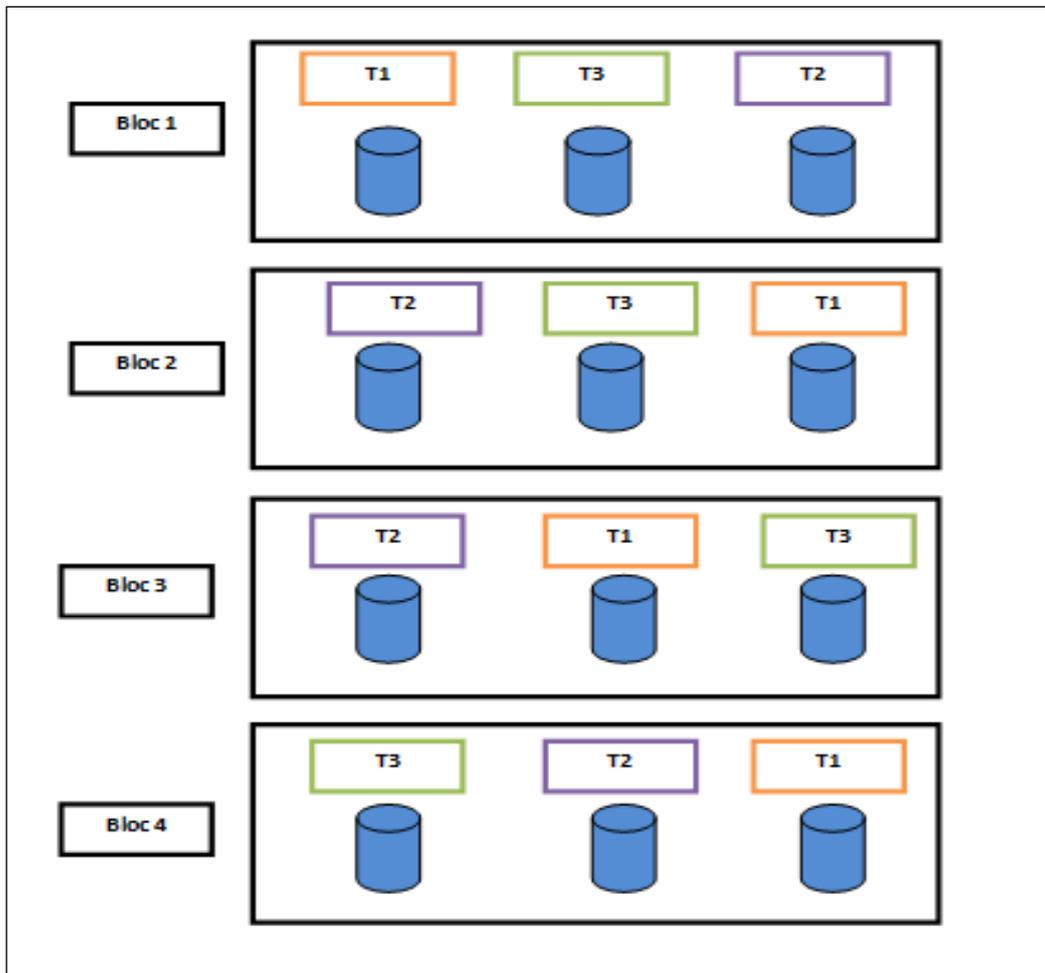
Les colonnes sont alimentées à la surface du sol par une éprouvette. Les quantités Lessivées sont représentées dans le tableau 15.

**Tableau 15 : Doses de lessivage appliqué**

| <b>Traitements</b>  | <b>Doses de lessivage</b> | <b>Quantité lessivées (mg/colonne)</b> |
|---------------------|---------------------------|--|
| <b>Traitement 1</b> | 35mm                      | 136 ml                                 |
| <b>Traitement 2</b> | 70mm                      | 272ml                                  |
| <b>Traitement 3</b> | 140mm                     | 545ml                                  |

### *1.3.3. Dispositif expérimental*

Le dispositif que nous avons utilisé, est un Dispositif en Blocs Aléatoires Complets (**DBAC**) avec 4 répétitions, et chaque bloc est constitué de trois doses (figures 15 et 16).



**Figure 15 : Dispositif expérimental de l'essai en colonne PVC**

**Avec : T1 : Traitement 1 (35mm), T2 : Traitement 2 (70mm), T3 : Traitement 3 (140mm)**



**Figure 16 : Dispositif expérimental adopté pour l'essai en colonne PVC**

### 1.3.4. Analyses chimiques

A la fin de chaque essai, nous avons procédé à deux types d'analyses chimiques : analyse des trois horizons du sol, et analyse de la solution drainée (lixiviat).

#### a. Analyse chimique du lixiviat

Après chaque expérimentation, La solution drainée est collecté à la suite successivement, pour qu'elle soit analysée par la suite, afin de déterminer les concentrations des éléments mobilisés au-delà du profil du sol, lors de lessivage.

La concentration en bore soluble a été déterminée par colorimétrie (Varaian UV-Visible), la concentration en cations métalliques (K, Ca, Mg Na, Fe, Mn, Cu et Zn) est déterminée par l'analyse du plasma, à l'aide de l'appareil Inductive Coupled Plasma ; (ICP Thermochimie La concentration en  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NH}_4^+$  est déterminée par flux continu (Skalar San++), tandis que la concentration en  $\text{HCO}_3^-$  est déterminée par dosage volumétrique.

#### b. Analyse chimique du sol

Le profil du sol de chaque colonne a été divisé en trois horizons superposés de 10 cm :

- Horizon supérieure (0-10 cm),
- Horizon intermédiaire (10-20 cm),
- Horizon inférieure (20-30 cm).

Ensuite, chaque couche a été prélevée puis séchée à 40 °C, afin de déterminer sa composition chimique. La teneur des cations métalliques (Fe, Mn, Cu et Zn) échangeable a été extraite par l'agent chélatant 'DTPA' et déterminée par spectrométrie d'absorption atomique (Varian AA240 FS). Tandis que la teneur en bore soluble est extraite par l'eau chaude et déterminée par colorimétrie (Varian UV-visible).

Après l'analyse la teneur en B est exprimée en mg/100g du sol alors que les teneurs des autres éléments chimiques sont exprimées en méq/100 g du sol.

### 1.4. Analyse statistique

La statistique descriptive et l'élaboration des figures ont été faites par le logiciel Excel, version 2016.

La base des données a subi une analyse de la variance, avec le seuil de signification de 5%, pour tester l'effet de la dose de lessivage et de l'horizon du sol sur la migration et les pertes en cations et en anions du sol, ainsi que leur distribution tout le long du profil du sol.

En cas de rejet de l'hypothèse nulle, une comparaison des moyennes a été réalisée à l'aide du test de Student-Newman-Keuls (S.N.K) à 5% de probabilité. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SPSS version 20.

Au niveau des résultats graphiques, des paramètres étudiés, les moyennes qui suivies des mêmes lettres, sont statistiquement similaires.

## 2. Essai en lysimètre

### 2.1. Mise en place et conduite de l'essai

#### 2.1.1. Installation des lysimètres

Nous avons choisi une parcelle, dont la pente est régulière et uniforme, une fosse est creusée à l'intérieur du sol avec deux différentes profondeurs, une à 30cm et l'autre 60cm, puis nous avons posé un support métallique en fer de 0.5cm de largeur et 0,5cm de longueur protégé par un anti rouille. Ensuite, une couche de 2cm de gravier a été ajoutée sur cet ensemble. A l'extrémité de chaque fosse se trouve une colonne.

Les échantillons de l'eau qui circule obliquement dans les lysimètres, sont recueillis et stockés dans des récipients plastiques disposées dans le centre des colonnes. A la suite de l'installation des lysimètres, une culture de blé tendre a été installée sur place.

Les lysimètres sont soumis à une irrigation de 20mm, et 424mm de précipitation.

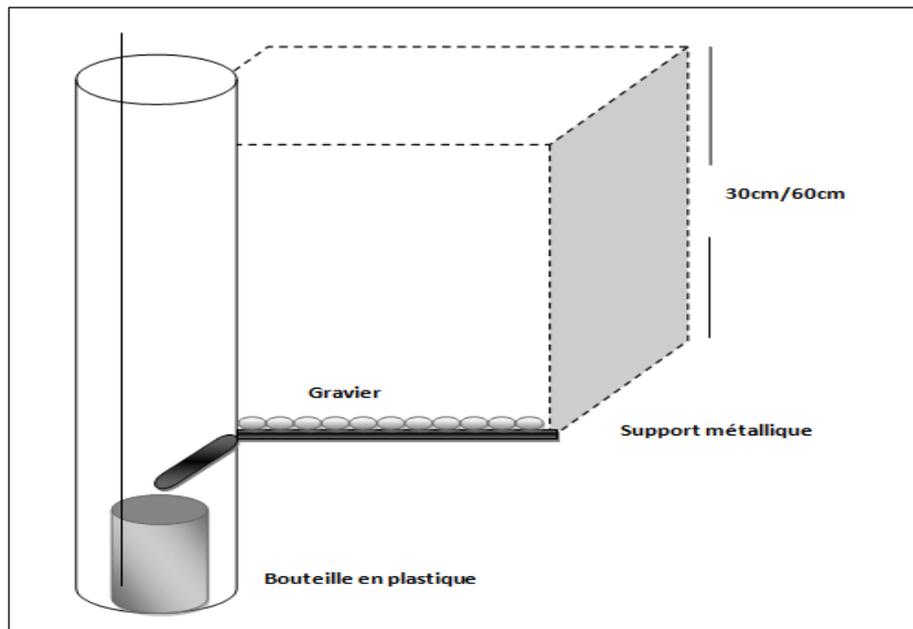


Figure 17 : Représentation du protocole expérimental adopté pour les lysimètres



**Figure 18 : Représentation du protocole expérimental adopté pour les lysimètres au Domaine Louata**

Au niveau des lysimètres, un seul essai de lessivage a été effectué est lessivage d'un mélange de cinq oligoéléments (Fe, Cu, Mn, B, Zn) apportés.

Les oligo-éléments à étudier ont été apportés sous forme d'engrais à la surface du sol, chaque bloc contient deux traitements le premier à 30cm et le deuxième à 60cm.

Le tableau 16 représente les quantités d'engrais apporté.

**Tableau 16 : Forme et quantités apporté des oligo-éléments**

| Elément   | Forme chimique       | Teneur de l'élément (%) | Quantité apportée (ppm) |
|-----------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Fe</b> | Fe-EDDHA             | 6%                      | 1.2                     |
| <b>B</b>  | Solubore             | 21%                     | 0.5                     |
| <b>Cu</b> | Sulfate de cuivre    | 25%                     | 0.6                     |
| <b>Zn</b> | Sulfate de zinc      | 22.5%                   | 5                       |
| <b>Mn</b> | Sulfate de manganèse | 32%                     | 5                       |

### **2.1.2. Dispositif expérimental**

Le dispositif utilisé dans le suivi du comportement des oligo-éléments est un Dispositif en Blocs Aléatoires Complets (DBAC) avec 4 répétitions, chaque bloc est constitué de deux traitements le premier à 30cm et le deuxième à 60cm (Figures 19 et 20).

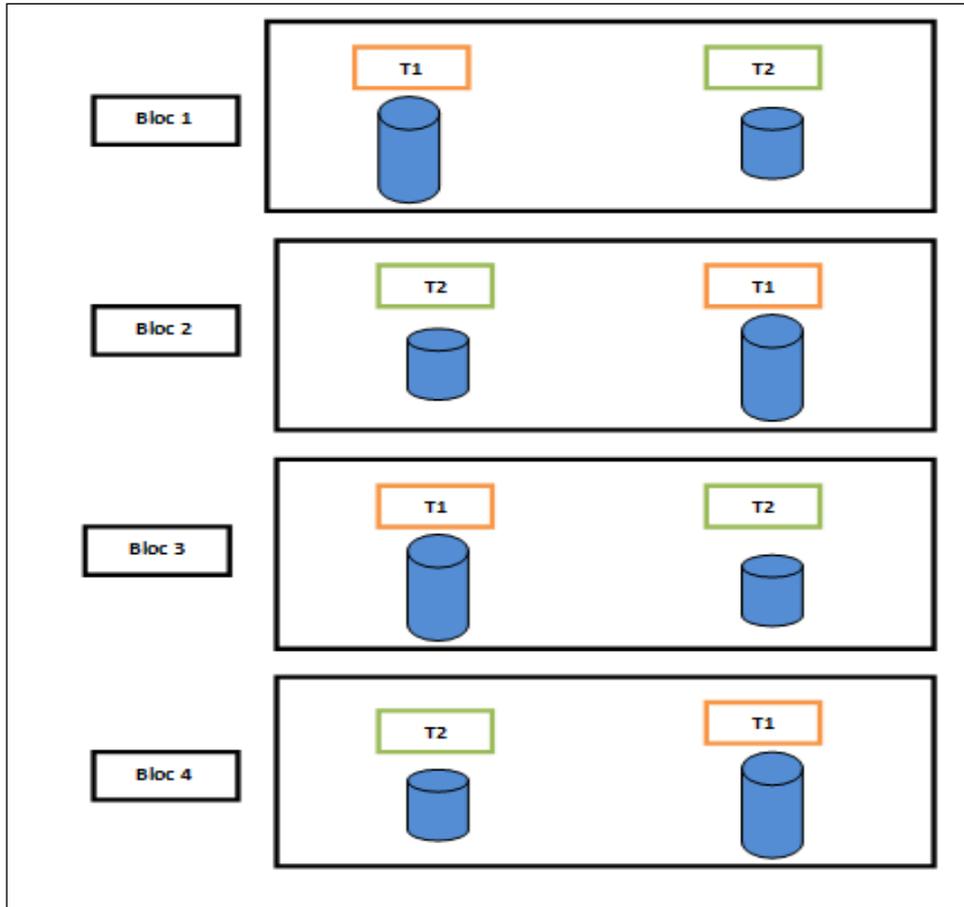


Figure 19 : Schémas du dispositif expérimental adopté pour les lysimètres

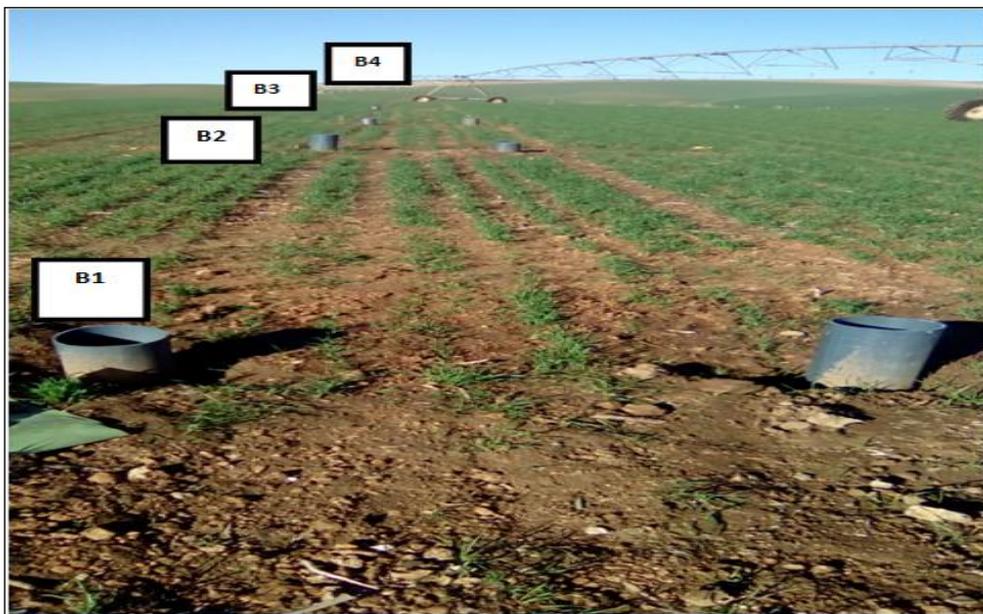


Figure 20 : Dispositif expérimental des lysimètres au Domaine Louata



**Figure 21 : Localisation géographique de l'essai des lysimètres au niveau du Domaine Louata**

### 2.1.3. Analyse du sol

Avant l'installation de l'essai des analyses ont été réalisées au laboratoire pour détecter l'ensemble des composants du sol étudié et déterminer leur teneurs.

#### a. Granulométrie

Le tableau ci-dessous montre les formes granulométriques présents dans chaque lysimètre.

**Tableau 17 : Composition granulométrique des sols (LABOMAG, 2018)**

| Bloc | Traitement | Horizon | Argile (%) | Limons fins (%) | Limon grossier (%) | Sable fin (%) | Sable grossier (%) |
|------|------------|---------|------------|-----------------|--------------------|---------------|--------------------|
| 1    | 1          | 1       | 55         | 17,5            | 6                  | 9,8           | 11,8               |
| 1    | 2          | 1       | 52,3       | 18,7            | 9,5                | 11,1          | 8,3                |
| 1    | 2          | 2       | 52,7       | 17,8            | 10,2               | 11            | 8                  |
| 2    | 1          | 1       | 51,5       | 18,5            | 9,7                | 11,6          | 8,5                |
| 2    | 2          | 1       | 50,7       | 11,8            | 16,8               | 13,1          | 8,2                |
| 2    | 2          | 2       | 52         | 19              | 9,7                | 10,8          | 7,9                |
| 3    | 1          | 1       | 53,8       | 18,8            | 7                  | 12,6          | 8,8                |
| 3    | 2          | 1       | 53,3       | 17              | 9,6                | 12,3          | 7                  |
| 3    | 2          | 2       | 54,8       | 18,5            | 8,7                | 11,5          | 6,3                |
| 4    | 1          | 1       | 50         | 16              | 11,7               | 13,9          | 7,6                |
| 4    | 2          | 1       | 52,3       | 17,2            | 7                  | 11,4          | 6,6                |
| 4    | 2          | 2       | 56         | 16,5            | 8,3                | 10,7          | 8,2                |

D'après l'analyse réalisée, Le sol sur lequel les lysimètres sont installés est un sol argileux-calcaire, il contient un taux d'argile varie entre 50% et 56%, avec une teneur de limon grossier (11% -18%) ce qui est présenté dans le tableau 17.

### **b. pH**

D'après l'analyse, on remarque que tous les blocs ont un ph presque le même dans tous les lysimètres et varie entre 8,4 et 8,6 (Tableau 18).

**Tableau 18 : pH de la solution du sol (LABOMAG, 2018)**

| Bloc | Traitement | Horizon | pH eau |
|------|------------|---------|--------|
| 1    | 1          | 1       | 8,4    |
| 1    | 2          | 1       | 8,4    |
| 1    | 2          | 2       | 8,5    |
| 2    | 1          | 1       | 8,4    |
| 2    | 2          | 1       | 8,4    |
| 2    | 2          | 2       | 8,5    |
| 3    | 1          | 1       | 8,3    |
| 3    | 2          | 1       | 8,5    |
| 3    | 2          | 2       | 8,6    |
| 4    | 1          | 1       | 8,5    |
| 4    | 2          | 1       | 8,5    |
| 4    | 2          | 2       | 8,5    |

### **c. Matière organique**

D'après les analyses du laboratoire, l'ensemble des blocs montrent une richesse en matière organique surtout au niveau des deux premiers horizons de chaque bloc, tableau 19.

**Tableau 19 : Teneur du sol en matière organique (LABOMAG, 2018)**

| Bloc | Traitement | Horizon | Matière organique (%) |
|------|------------|---------|-----------------------|
| 1    | 1          | 1       | 3                     |
| 1    | 2          | 1       | 3,61                  |
| 1    | 2          | 2       | 2,01                  |
| 2    | 1          | 1       | 3,45                  |
| 2    | 2          | 1       | 4,15                  |
| 2    | 2          | 2       | 1,9                   |
| 3    | 1          | 1       | 4                     |
| 3    | 2          | 1       | 3,84                  |
| 3    | 2          | 2       | 2,02                  |
| 4    | 1          | 1       | 3,82                  |
| 4    | 2          | 1       | 3,42                  |
| 4    | 2          | 2       | 2,06                  |

## **2.2. Analyses chimiques**

On procède à deux types d'analyses chimiques : analyse du sol par horizon et analyse de la solution drainée (lixiviât).

### ***2.2.1. Analyse chimique du lixiviât***

La solution drainée est collectée successivement, pour qu'elle soit analysée à la suite, afin de déterminer les concentrations des éléments mobilisés au-delà du profil du sol lors de lessivage.

### ***2.2.2. Analyse chimique du sol***

Le profil du sol de chaque lysimètre a été divisé en un nombre d'horizons superposés selon le traitement :

- Traitement 1, le profil a été divisé en 3 horizons superposés ; Horizon 1 : de 0cm à 10cm, horizon 2 : de 10cm à 20cm, et horizon 3 : de 20cm à 30cm
- Traitement 2, le profil du sol a été divisé en quatre horizons ; Horizon 1 : de 0cm à 10cm, horizon 2 : de 10cm à 20cm, horizon 3 : de 20cm à 30cm, et le dernier de 30cm à 60cm

À la suite, des prélèvements du sol ont été effectués, afin de déterminer la composition chimique de chaque horizon.

Après l'analyse chimique la teneur en B est exprimée en mg/100g du sol alors que les teneurs des autres éléments chimiques sont exprimées en méq/100 g du sol.

## **2.3. Analyse statistique**

L'outil de saisie des données est Excel 2016. Alors que la base de données a subi une analyse de la variance, à 5% de probabilité, pour tester l'effet de la dose de lessivage et de l'horizon du sol sur la migration et les pertes en cations et en anions du sol, ainsi que leur distribution tout le long du profil du sol.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SPSS version 20. Au niveau des résultats graphiques, des paramètres étudiés, les moyennes suivies des mêmes lettres sont statistiquement similaires.

## RESULTATS ET DISCUSSION

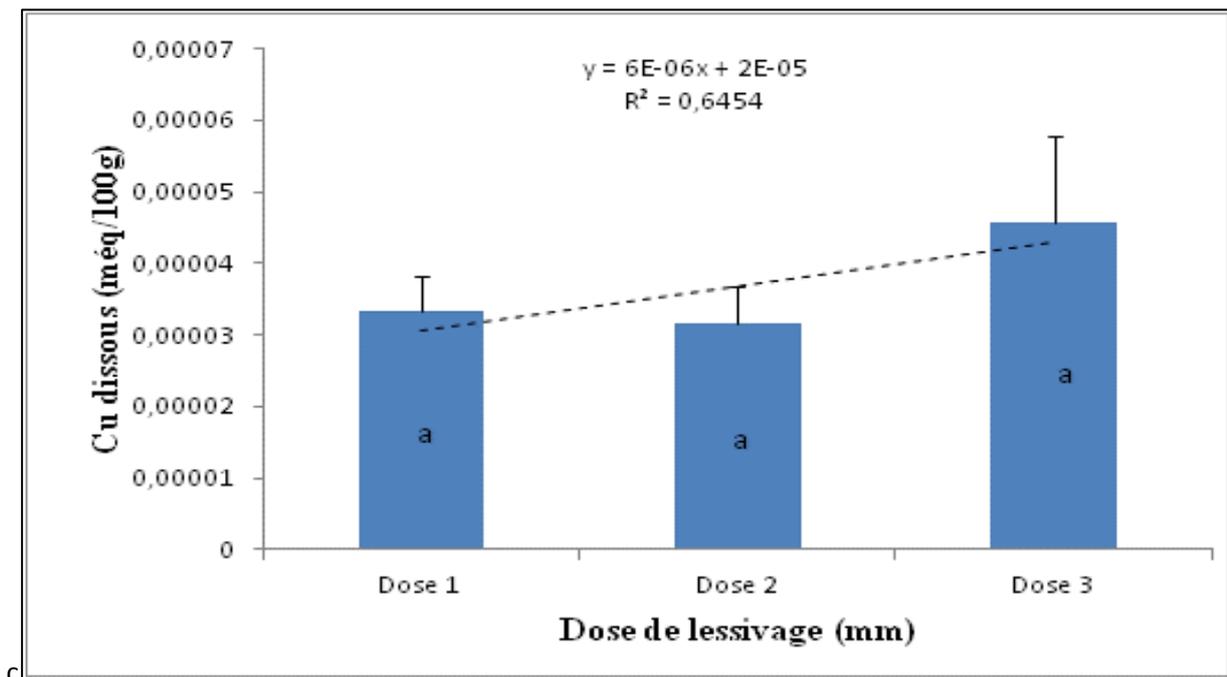
---

## I. Lessivage des oligo-éléments (Fe, Cu, Mn, Zn et B) dans les colonnes en PVC au niveau du sol argileux-calcaire

### I.1. Effet des doses de lessivage sur la mobilité du Cuivre apporté seul (Cu)

#### 1. Perte en cuivre par lessivage

D'après l'analyse du lixiviat, les résultats ont montré que les quantités lixiviées du cuivre n'augmentent pas significativement avec les doses de lessivage (Figure 22).



**Figure 22 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Cu selon les doses de lessivage**

\* Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3=140mm

D'après la figure ( 22 ), on a constaté que la quantité lixiviée en cuivre sous l'apport de 35 mm a été très négligeable ( $3,33 \cdot 10^{-5}$ ). Alors que la quantité lixiviée la plus élevée (sous l'apport de 140 mm). Ce constat suggère que seulement des quantités très faibles par rapport à la teneur du sol en cuivre ont dépassé les 30 cm de la colonne du sol.

Le pH , le calcaire et le taux de la matière organique élevé dans le sol étudié, peuvent êtres les principales responsable sur la rétention de la majorité du cuivre au niveaux du sol , beaucoup d'auteurs ont obtenu le même résultats effectivement Stumm et Morgan, (1996) ont trouvé que a pH basique, le cuivre peut précipiter, aussi dans les milieux anaérobiques, le cuivre précipite sous forme de sulfures et ne se lessive pas .

En plus les sols étant constitués en grande majorité de matière organique, d'argiles et de fer et de manganèse, qui tous possèdent des sites réactionnels donneurs d'électrons, comme les groupements COO-, OH-, capables de créer des liaisons fortes avec l'ion Cu<sup>2+</sup> ( Thomas lenoir,2011).

Même résultats ont été signalé par Er-rezza, (2017) dans son travail sur la mobilité du cuivre dans le sol argileux-limoneux, les quantités en cuivre après lessivage ont été négligeables par rapport à la teneur totale du sol en cuivre. Thomas lenoir, (2011) a rapporté que si le sol est argileux ou argilo-limoneux la majorité du cuivre pourra très bien être fixée sur les argiles en raison de leur abondance et donc le risque de lessivage reste négligeable.

## 2. Perte d'oligoéléments par lessivage

Concernant les oligoéléments, l'analyse a révélé la présence du B, Zn, Fe et Mn dans la solution drainée avec des quantités très négligeable qui ont été observées pour tous les doses de lessivage.

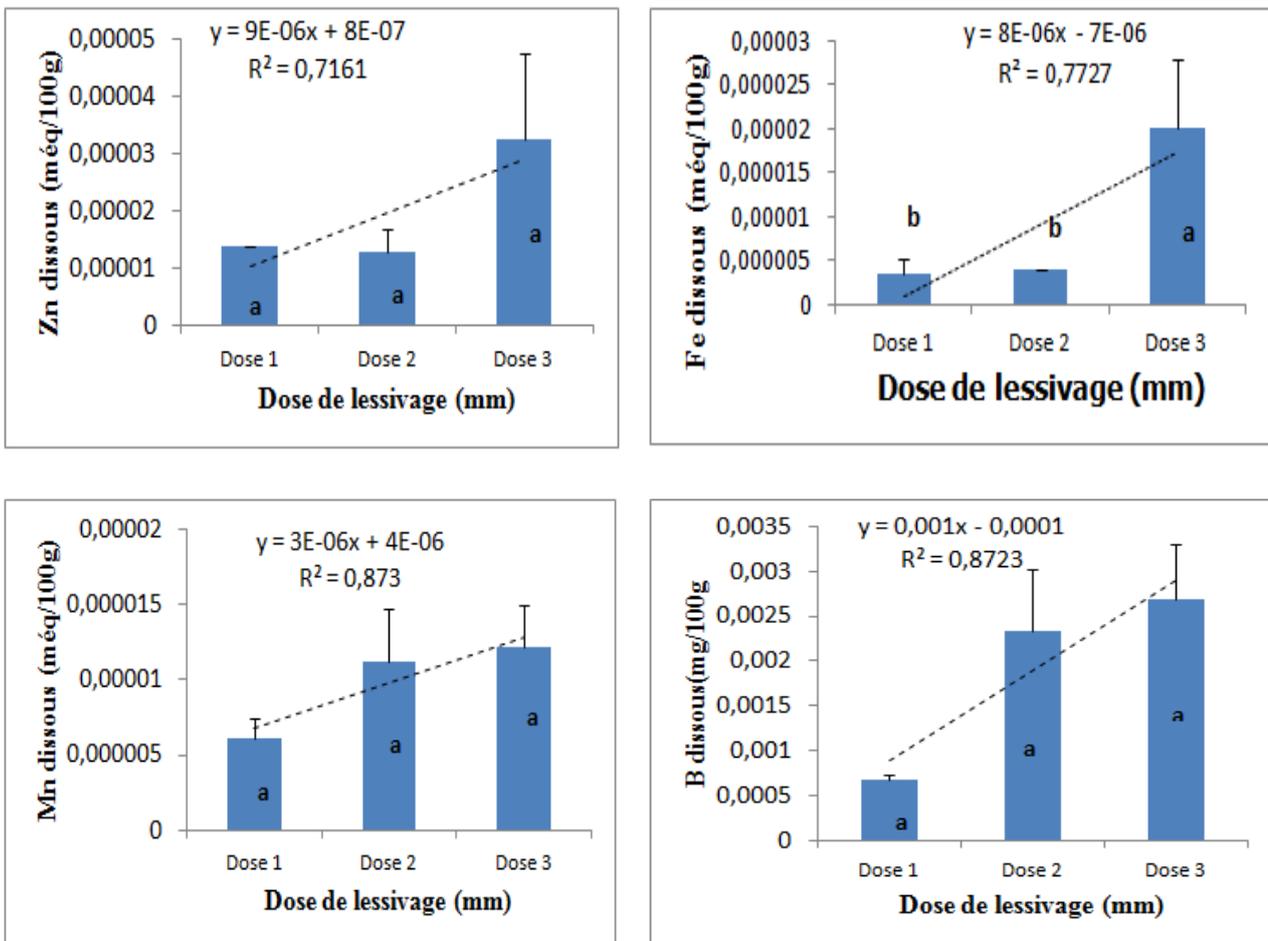


Figure 23 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en oligo-éléments selon les doses de lessivage

\* Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3=140mm

La quantité du fer lessivé au niveau de la dose la plus élevée (140mm) est de  $2.10^{-5}$  méq/100g, le zinc a enregistré une teneur de  $3,245.10^{-5}$  méq/100g (figure 23 ), alors que la teneur en bore échangeable été de  $0,0026.10^{-5}$  méq/100g pour la même dose (140mm) (figure), le manganèse est présent avec une concentration de  $1,12.10^{-5}$  méq/100g (figure 23).les faibles quantités des oligo-éléments trouvé dans le lexiviat sont lié a l'absence de l'apport de ces éléments.

### 3. Pertes du profil de sol (0-30 cm) en cations selon les doses de lessivage

L'analyse du lixiviat montre que des quantités importantes de Ca ont été trouvées dans le drainât, comparées aux autres éléments (K, P, Na, et Mg).Cela peut être expliqué par la teneur élevée du sol en Ca (11130ppm du CAO) par rapport aux autres éléments. (Figure 24).

Le calcium se trouve avec 0.068 méq/100 g, 0.147 méq/100 g et 0.277 méq/100 g pour les trois doses croissantes respectivement et augmente significativement avec les doses. Tandis que les pertes en K, Mg, P, et Na sont faibles par rapport au Ca et elles ont augmenté significativement avec les doses de lessivage. (Figure24).

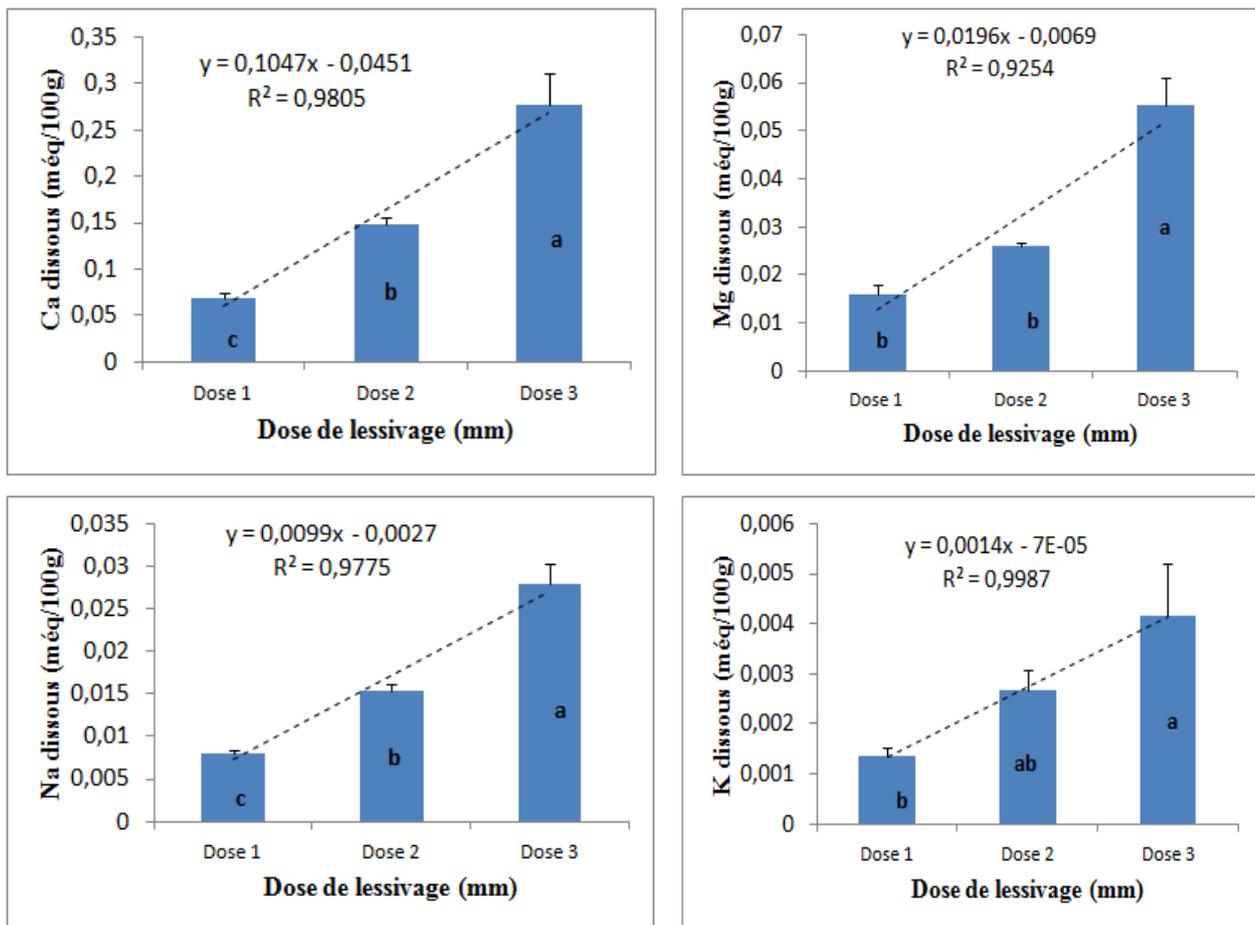


Figure 24 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Na, Mg,Ca et K selon les doses de lessivage

\* Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3=140mm

#### 4. Distribution du cuivre dans le sol après lessivage

Des concentrations élevées de cuivre échangeable (0.007à 0.01még/100g du sol) ont été observées dans l’horizon supérieur (0-10 cm) pour les différentes doses de lessivage (tableau20) En revanche, la concentration du Cu au niveau des deux horizons inférieurs est inférieure significativement à celle du premier horizon dans les deux doses (70mm, et 140mm). Ce résultat suggère que le cuivre est immobile et reste fixé au niveau de la couche (0-10cm), malgré l’augmentation de la dose de lessivage appliqué.

**Tableau 20 : Répartition du cuivre dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage**

| Horizon                          | Dose de Lessivage |                 |                  |
|----------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
|                                  | 35mm              | 70mm            | 140mm            |
| <b>Cu échangeable (még/100g)</b> |                   |                 |                  |
| <b>Horizon 1</b>                 | 0,0084±0,0015Aa   | 0,0091±0,0013Aa | 0,0101±0,00178Aa |
| <b>Horizon 2</b>                 | 0,0073±0,0015Aa   | 0,0069±0,0008Ba | 0,0073±0,0009Ba  |
| <b>Horizon 3</b>                 | 0,007±0,0009Aa    | 0,0061±0,0014Ba | 0,0071±0,0012Ba  |

*\* valeurs sous forme de moyenne± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose*

Ce constat est attribué à la faible mobilité du cuivre dans le sol. Ceci est conforme à la constatation antérieure de Er-rezza, (2017) qui a signalé que le cuivre est peu mobile dans le sol argilo-limoneux et s’accumule à la surface du sol.

Les résultats obtenus suggère aussi que les caractéristiques physico-chimiques sont les responsables sur la fixation du cuivre surtout le pH (pH du sol étudié =8,6), la teneur élevé en matière organique (MO%=3,4), la présence d’une quantité importante du Ca (CaO=11130ppm) et la teneur élevé en argile, en effet Dejou et al ., (1985) ont rapporté que le cuivre est puissamment retenu par les argiles et par la matière organique. Toutefois le sol étudié est très riche en phosphore et loué, (1993) a signalé que la présence des teneurs élevés du phosphore agit sur la biodisponibilité du cuivre au niveau du sol.

En conclusion, le Cu est considéré immobile dans le sol argileux-calcaire. Ceci dit que lors de l'établissement des plans de fertilisations, il faut tenir en compte de la non-sensibilité du Cu au lessivage.

**5. Distribution des oligo-éléments au sol selon les doses de lessivage**

L'oligo-élément déjà présent au niveau du sol ne présente aucune sensibilité au lessivage, en effet les analyses statistiques ont montré que la quantité du Fe, B, Mn, et Zn échangeable au niveau des trois horizons ne présente aucune différence significative. Cela peut être par ce qu'on n'a pas apporté ces éléments.

**Tableau 21 : Répartition du Fe, Mn, et Zn dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                     |                 |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm                | 140mm           |
| <b>Fer échangeable (méq/100g)</b> |                   |                     |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,1144±0,0698Aa   | 0,1127±0,0515Aa     | 0,1623±0,0808Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,1453±0,0750Aa   | 0,1159±0,0367Aa     | 0,1767±0,0721Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,1283±0,0581Aa   | 0,0785±0,0247Aa     | 0,1856±0,0802Aa |
| <b>Zn échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                     |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,0021±0,0002Aa   | 0,0020±0,0002Aa     | 0,0023±0,0003Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,0022±0,0003Aa   | 0,0021±0,0001Aa     | 0,0021±0,0001Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,0022±0,0001Aa   | 0,0020± 3,916E-05Aa | 0,0021±0,0001Aa |
| <b>Mn échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                     |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,3436±0,1588Aa   | 0,4053±0,060Aa      | 0,4457±0,1788Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,3855±0,1328Aa   | 0,3215±0,1435Aa     | 0,4138±0,0699Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,5365±0,0250Aa   | 0,3110±0,0845Aa     | 0,4173±0,1052Aa |

*\* valeurs sous forme de moyenne± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose*

**Tableau 22 : Répartition du B dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage**

| Horizon                        | Dose de Lessivage |                  |                  |
|--------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                                | 35mm              | 70mm             | 140mm            |
| <b>B échangeable (mg/100g)</b> |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>               | 0,0232±0,0025Aa   | 0,0182±0,0032Aa  | 0,02125±0,0013Aa |
| <b>Horizon 2</b>               | 0,0275±0,0027Aa   | 0,02475±0,0035Aa | 0,0215±0,0019Aa  |
| <b>Horizon 3</b>               | 0,0265±0,0024Aa   | 0,026±0,0030Aa   | 0,0225±0,0023Aa  |

*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose*

### **6. Distributions des autres éléments au niveau du sol après lessivage**

Pour les autres cations P, Mg, Ca, et K sont pas sensible au doses de lessivage appliqué cette dernière n'a aucune effet significatif sur la distribution des ces éléments au niveau du profil du sol (0-30cm), alors que les teneurs du Na dans les deux horizons ingerieur est supérieur que l'horizon (0-10cm) ce qui montre ca forte mobilité.

**Tableau 23 : Répartition du Mg, P et K dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage.**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                 |                 |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>Mg échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 2,7915±0.0958Aa   | 3,0124±0.1664Aa | 2,8238±0.1566Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 2,6650±0.1022Aa   | 2,7952±0.0400Aa | 2,6811±0.1533Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 2,5942±0.0521Aa   | 2,7655±0.0656Aa | 2,6972±0.1061Aa |
| <b>K échangeable ( méq/100g)</b>  |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 1,6752±0.0321Aa   | 1,6421±0,0793Aa | 1,6345±0,0154Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 1,7911±0,0335Aa   | 1,6959±0,0344Aa | 1,7118±0,0525Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 1,7056±0,0309Aa   | 1,5869±0,0733Aa | 1,6401±0,0666Aa |
| <b>P échangeable ( méq/100g)</b>  |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,0778±0.0038Aa   | 0,0743±0,0026Aa | 0,0701±0,0062Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,0715±0,0057Aa   | 0,0725±0,0037Aa | 0,0686±0,0040Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,0722±0,0037Aa   | 0,0757±0,0056Aa | 0,0690±0,0063Aa |

*\* valeurs sous forme de moyenne± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose*

**Tableau 24 : Répartition du Na, et Ca dans le profil du sol (0-30 cm) en fonction des doses de lessivage.**

| Horizon                          | Dose de Lessivage |                  |                  |
|----------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                                  | 35mm              | 70mm             | 140mm            |
| <b>Ca échangeable (méq/100g)</b> |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                 | 46,4312±3,8634Aa  | 43,3110±4,1047Aa | 42,5789±4,8764Aa |
| <b>Horizon 2</b>                 | 47,1178±4,1704Aa  | 43,6507±3,8610Aa | 43,0363±4,0956Aa |
| <b>Horizon 3</b>                 | 43,7221±4,4088Aa  | 42,1499±4,7197Aa | 41,9199±4,4779Aa |
| <b>Na échangeable (méq/100g)</b> |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                 | 0,1888±0,0057Ba   | 0,1638±0,0154Ba  | 0,1606±0,0186Ba  |
| <b>Horizon 2</b>                 | 0,2324±0,015Aa    | 0,2147±0,0134Aa  | 0,1985±0,0053Aa  |
| <b>Horizon 3</b>                 | 0,2445±0,0133Aa   | 0,2147±0,0134Aa  | 0,2195±0,0087Aa  |

*\* valeurs sous forme de moyenne± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose*

## I.2. Effet des doses de lessivage sur la mobilité du bore apporté seul (B)

### 1. Perte du bore par lessivage

Les analyses statistiques ont montré que la dose de lessivage a affecté significativement la quantité du bore lessivé, cette a varié entre un minimum de 0,00025méq/100g enregistré avec la dose. En effet, 95 % de l'augmentation des quantités perdues en bore est expliquée par l'augmentation de la dose de lessivage ( $R^2 = 0.95$ ).ce résultat est similaire a ceux rapporté par Er-rezza, (2017) qui a trouvé que les pertes en B ont augmenté significativement avec la dose de lessivage.et que 99 % de l'augmentation des quantités perdues en bore est expliquée par l'augmentation de la dose de lessivage ( $R^2 = 0.99$ ).

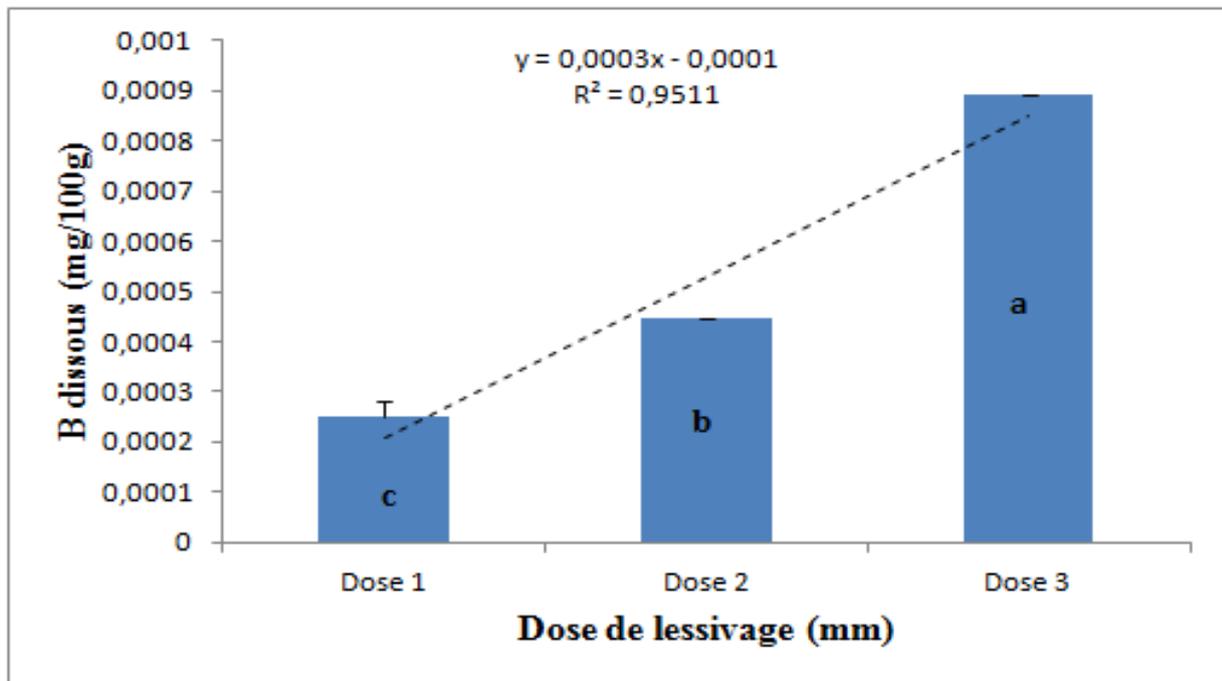


Figure 25 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en B selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

D'après la figure, on a constaté que le bore est élément très mobile. D'où vient l'importance de prendre en considération sa sensibilité au lessivage lors de l'établissement du plan de fertilisation.

### 2. Perte en oligo-éléments par lessivage

Quant aux autres oligo-éléments, l'analyse de la variance a révélé des effets significatifs de la dose de lessivage sur les quantités lixivié. la comparaison des moyennes , par le test S-N-K au seuil de 5% , a permis de classer les teneur échangeable de Fe, Cu, Zn, et mn issus après chaque traitements en deux groupes différents : le premier groupe comporte les quantités obtenu après la

première dose (35mm) et la deuxième dose ( 70mm), et le deuxième groupe comporte les quantités issus après l’application de la dose 3 (140mm).

En outre les quantités lessivées ont été très faible par rapport à la teneur du sol en ces éléments.

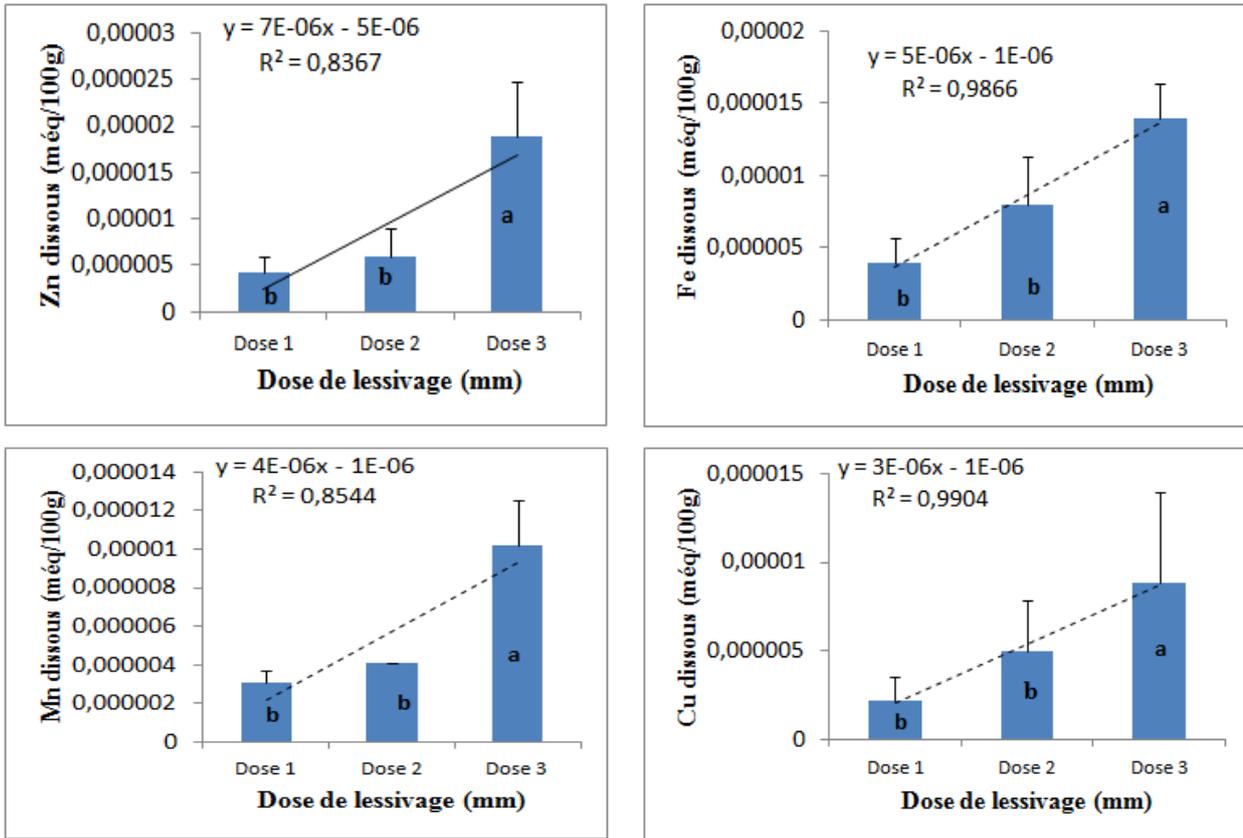


Figure 26 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Fe, Cu, Mn et Zn selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

### 3. Perte en d’autres éléments par lessivage

L’analyse du lixiviat a montré la présence des cations du calcium en quantité importante. Le même constat est dressé pour le potassium, le sodium, et le magnésium. D’après la figure 27, pour le Mg, Na ,Ca et le potassium , l’étude statistique a montré que la dose a un effet significatif sur le lessivage de ces derniers en effet l’analyse de la variance a permis de distinguer trois groupes différents, le premier contient les quantités lixivié après la dose 1 (35mm) , suivi par ceux obtenus lors de la dose 2 (70mm),et enfin celui contenant les quantité lixivié lors de l’application de la troisième dose (140mm).

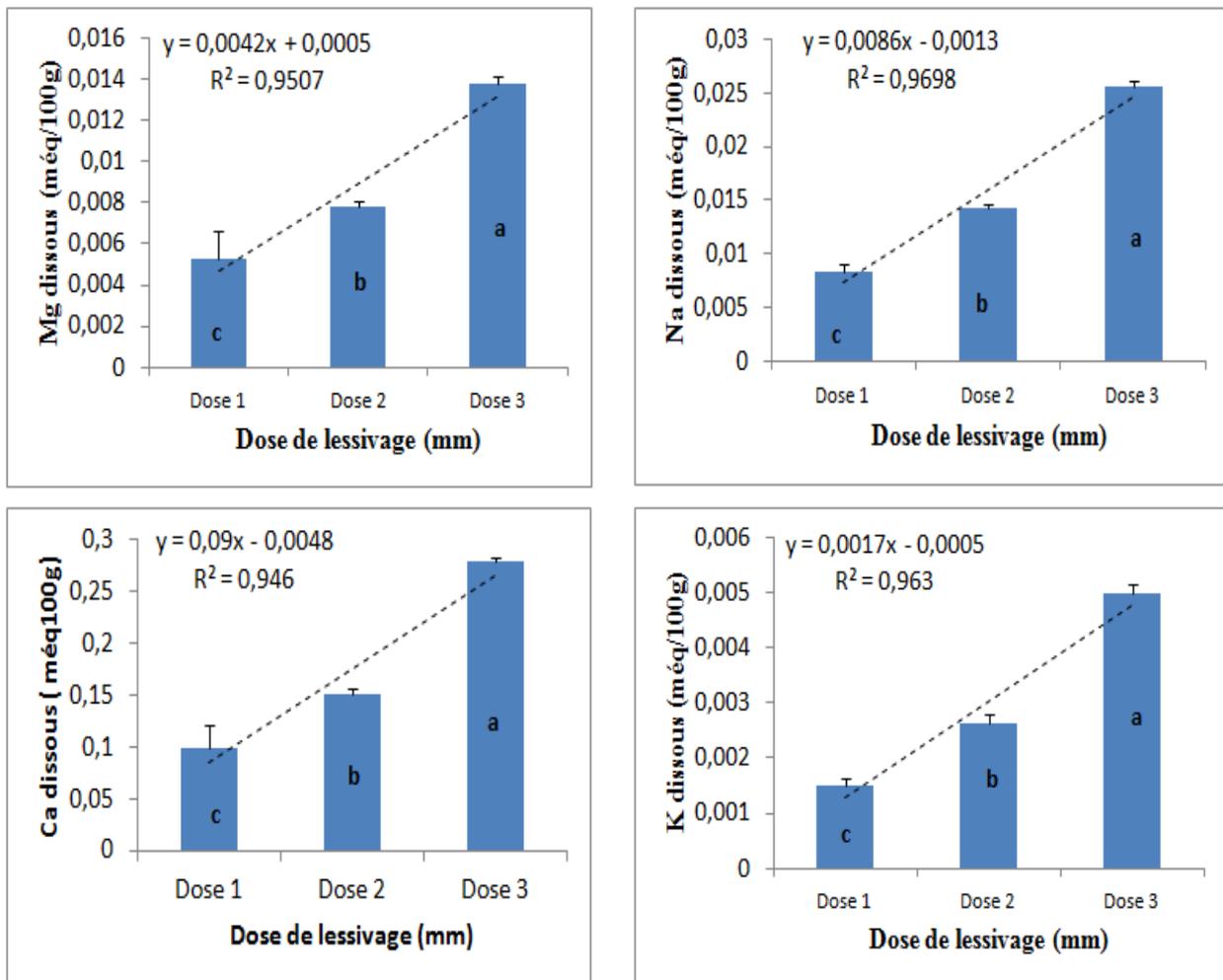


Figure 27 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Ca, Na, Mg et K selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

L'analyse du lixiviat a montré l'absence du P pour tous les niveaux de lessivage. Ce constat affirme que le phosphore n'a pas dépassé les 30 cm du sol.

#### 4. Distribution du bore au niveau du profil du sol (0-30cm)

Les analyses statistiques ont montré que teneurs en B soluble dans les différents horizons du sol ne varient pas ni en fonction de la dose de lessivage apportée ni en fonction des horizons (Tableau 25). D'après le tableau 25, la différence entre la quantité du bore soluble au niveau des horizons n'est pas significative, ce qui coïncide avec des résultats trouvés par Er-rezza, (2017) qui a signalé que le bore est le B est moins mobile dans le sol limono-argileux que dans le sol sablonneux.

**Tableau 25 : Répartition du bore dans le sol après le lessivage**

| Horizon                         | Dose de Lessivage |                 |                 |
|---------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                 | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>B échangeable ( mg/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                | 0,0327±0,0029Aa   | 0,0212±0,0082Aa | 0,029±0,0031Aa  |
| <b>Horizon 2</b>                | 0,032±0,0028Aa    | 0,0317±0,0041Aa | 0,0272±0,0035Aa |
| <b>Horizon 3</b>                | 0,0265±0,0029Aa   | 0,0335±0,0030Aa | 0,0247±0,0025Aa |

*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a : Horizon ; A : Dose*

Par ailleurs, les analyses de la variance suggère que le bore est fortement retenu dans le sol soit par la matière organique ou par les argiles, en effet Saur, (1989) a signalé que le bore est fortement fixé par les argiles et les substances organiques, d'un autre part la teneur élevée en calcaire actif au niveau du sol étudié peut être la responsable sur la rétention du bore.

Cette fixation du bore peut probablement due a l'effet du pH sur la disponibilité du bore soluble au niveau du sol, dans ce sens Hening Hu et Patrick H. Brown, (1997) ont rapporté que le pH élevé influence sur la disponibilité du bore dans le sol.

### **5. Distribution oligo-éléments après lessivage**

L'analyse statistique montrent que la dose n'a pas d'effet sur la distribution du cuivre et du manganèse, toutefois la dose a affecté la distribution du zinc dans le sol, alors que pour le fer l'analyse de la variance montre que la distribution de ce dernier est différente selon les horizons du sol tableau ( 26) .

**Tableau 26 : Répartition du fer et du zinc au niveau du sol après lessivage**

| Horizon                            | Dose de Lessivage |                    |                 |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
|                                    | 35mm              | 70mm               | 140mm           |
| <b>Fer échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                    |                 |
| <b>Horizon 1</b>                   | 0,0834±0,0053Aa   | 0,0712±0,0074Aa    | 0,0600±0,0036Aa |
| <b>Horizon 2</b>                   | 0,0921±0,0073Aa   | 0,0909±0,0177Aa    | 0,0896±0,0092Aa |
| <b>Horizon 3</b>                   | 0,0701±0,009Aa    | 0,111±0,0132Aa     | 0,0877±0,0038Aa |
| <b>Zn échangeable ( méq/100g)</b>  |                   |                    |                 |
| <b>Horizon 1</b>                   | 0,0024±0,0003Aa   | 0,0019±8,028E-05Aa | 0,0021±0,0001Aa |
| <b>Horizon 2</b>                   | 0,0021±0,0001Aa   | 0,002±3,224E-05Aa  | 0,0021±0,0001Aa |
| <b>Horizon 3</b>                   | 0,0021±0,0001Aa   | 0,0017±0,0002Aa    | 0,0020±0,0001Aa |

\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard

\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a : Horizon ; A : Dose

**Tableau 27 : Distribution du Mn et du Cu dans le sol selon les doses de lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                 |                 |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>Mn échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,2498±0,0385Aa   | 0,2351±0,0292Aa | 0,2029±0,0310Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,2512±0,0773Aa   | 0,2796±0,0507Aa | 0,1882±0,0441Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,2125±0,0342Aa   | 0,2921±0,0511Aa | 0,3751±0,0278Aa |
| <b>Cu échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,0057±0,0002Aa   | 0,0049±0,0003Aa | 0,0046±0,0002Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,0066±0,0005Aa   | 0,0058±0,0008Aa | 0,0055±0,0002Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,0055±0,0008Aa   | 0,0065±0,0010Aa | 0,0043±0,0016Aa |

\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard

**6. Distribution des autres éléments au niveau du sol**

Pour les autres éléments P, Na, K, Ca et Mg présent dans le sol, l'analyse de la variance a révélé qu'il n'y a pas d'effet significatif de la dose sur la distribution des éléments chimiques, juste pour le calcium dont la teneur diffère selon les horizons du sol.

**Tableau 28 : Répartition dans le sol du Na, et Mg après l'application des doses de lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                 |                 |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>Na échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,1735±0,0099Aa   | 0,1412±0,0083Aa | 0,1331±0,0179Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,2017±0,0191Aa   | 0,1969±0,0151Aa | 0,1775±0,0120Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,1969±0,0253Aa   | 0,2106±0,0015Aa | 0,2203±0,0255Aa |
| <b>Mg échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 2,5930±0,0968Aa   | 0,1786±0,1031Aa | 0,1802±0,1040Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,1935±0,1117Aa   | 0,2509±0,1448Aa | 0,2184±0,1261Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,1163±0,0671Aa   | 0,2012±0,1162Aa | 0,0890±0,0513Aa |

*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a : Horizon ; A : Dose*

**Tableau 29 : Répartition de k, Ca et P dans le sol après lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                  |                  |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                                   | 35mm              | 70mm             | 140mm            |
| <b>K échangeable ( méq/100g)</b>  |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                  | 1,4382±0,0652Aa   | 1,4052±0,0442Aa  | 1,3925±0,0445Aa  |
| <b>Horizon 2</b>                  | 1,3967±0,0412Aa   | 1,4551±0,0703Aa  | 1,4105±0,0466Aa  |
| <b>Horizon 3</b>                  | 1,4477±0,0444Aa   | 1,4047±0,0362Aa  | 1,3452±0,0391Aa  |
| <b>P échangeable ( méq/100g)</b>  |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,0722±0,0054 Aa  | 0,0708±0,0029Aa  | 0,0732±0,0034Aa  |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,0715±0,0059Aa   | 0,0690±0,0017Aa  | 0,0715±0,004Aa   |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,0715±0,0036Aa   | 0,0718±0,0038Aa  | 0,0651±0,0040Aa  |
| <b>Ca échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                  | 33,6124±1,939Aa   | 34,7717±2,4219Aa | 34,0208±2,1035Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 33,4082±2,2702Aa  | 33,8496±2,2167Aa | 33,0238±2,2272Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 33,8032±2,1748Aa  | 32,3595±2,2362Aa | 31,5222±2,3495Aa |

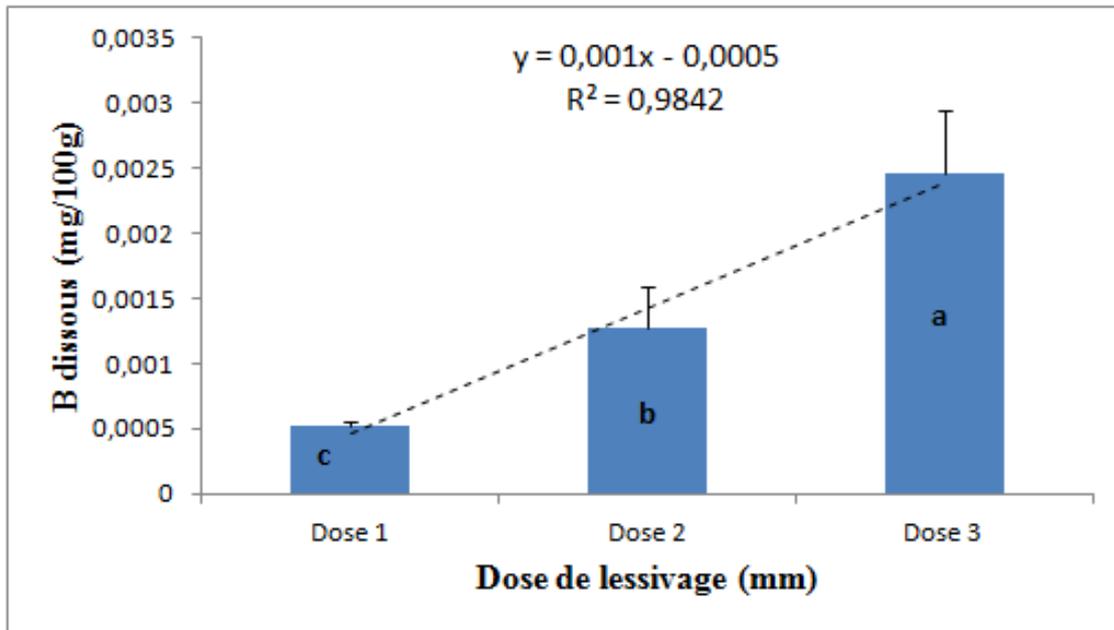
*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a : Horizon ; A : Dose*

## **I.2. Effet des doses de lessivage sur la mobilité des oligoéléments (Fe, Cu, Mn, Zn, et B) apportés en mélange**

### **1. Perte d'oligoéléments par lessivage**

Les pertes par lessivage des cinq oligoéléments apportés en mélange (Fe, Cu, Mn, Zn et B) ont enregistré une tendance linéaire en fonction des doses de lessivage apportées. Cette tendance a été similaire pour le cas du B à celle de l'expérience précédente où on a apporté le B tout seul (Figure 28).

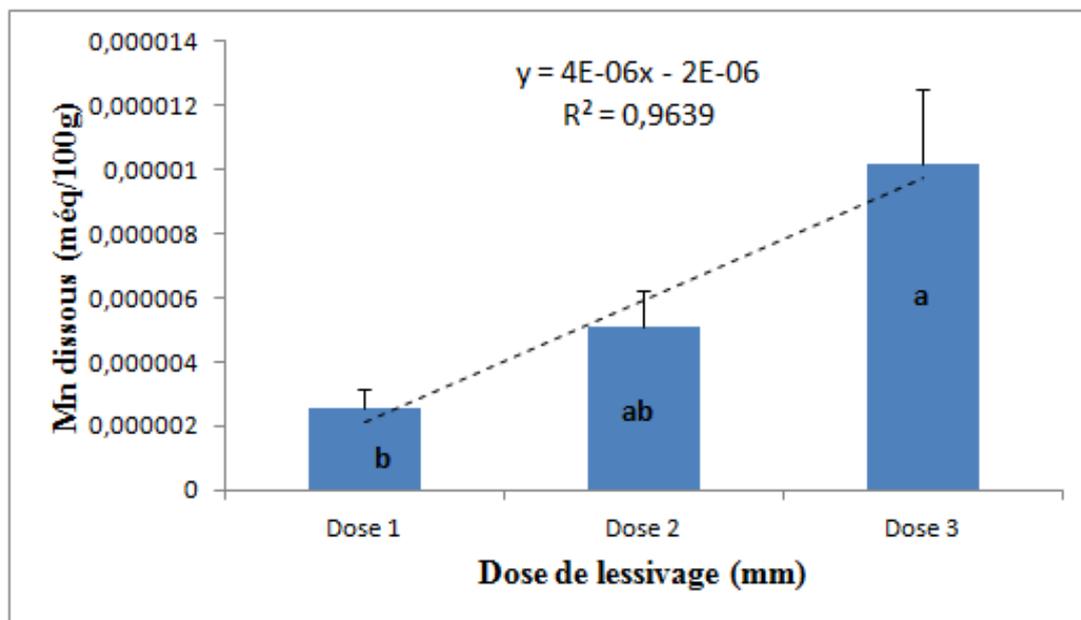


**Figure 28 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en B selon les doses de lessivage**

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

Quant au B, les résultats ont montré une tendance similaire des pertes comparée à l'expérience où le bore a été apporté seul. Les quantités lessivées selon les doses de lessivage respectivement sont 0,00052 méq/100g, 0,00128méq/100g, 0,0024méq/100g. Les quantités lessivées en bore augmentent significativement en fonction des doses de lessivage 98% de cette augmentation est justifiée par l'augmentation de la dose de lessivage apportée. Ces résultats coïncident avec ceux obtenus par Er-rezza, (2017) qui ont montré le bore un élément mobile qui se lessive facilement en augmentant les doses de lessivage.

En revanche, on a constaté la présence de quantités très négligeables de Mn par rapport à la teneur totale du sol après le lessivage en effet la quantité lessivée au niveau de la troisième dose (140mm) est de  $1,016 \cdot 10^{-5}$  méq/100g. Les quantités de manganèse lessivées ont augmenté significativement avec la dose de lessivage apportée. Effectivement 96 % de l'augmentation des quantités perdues en manganèse est expliquée par l'augmentation de la dose de lessivage ( $R^2 = 0.96$ ) (Figure 29).



**Figure 29 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Mn selon les doses de lessivage**

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

Les résultats obtenus suggèrent que la forte concentration de la matière organique dans le sol étudié est le principal facteur sur la rétention de cet élément au niveau du sol.

En effet ( Meek et al, 1968; Lal et Taylor, 1970) ont rapporté que la richesse du sol en matière organique diminue la biodisponibilité de cet élément.

D'un autre part, les pertes du cuivre augmentent significativement avec les doses de lessivage comparées à ceux de lessivage du Cu apporté tout seul. En effet, 95 % de l'augmentation des quantités perdues en cuivre est expliquée par l'augmentation de la dose de lessivage ( $R^2 = 0.95$ ). On a remarqué que le cuivre est lessivé cette fois ci quand il été apporté en mélange avec le fer, zinc, bore, et manganèse, en effet ERREZA,(2017) a rapporté que les pertes en cuivre subit une augmentation remarquable comparées à ceux de lessivage du Cu apporté tout seul.

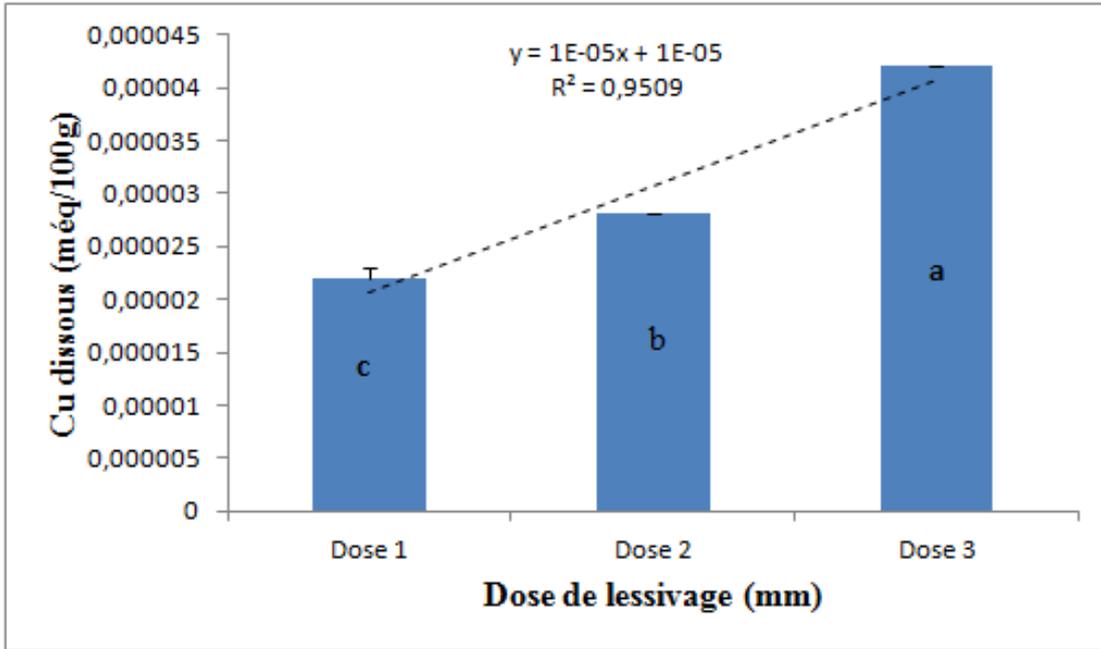


Figure 30 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Cu selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

Pour le fer l'analyse du drainât montre des quantité très faibles au niveau de la solution lixivié, la teneur en fer échangeable lessivé au niveau de la dose la plus élevé (140 mm) est de  $0,0001.10^{-5}$  , et les quantité lessivé augmente par 79% ( $R^2=0,79$ ) selon la dose de lessivage apporté .en effet Er-rezza,(2017) a signalé que les quantités lixiviées du Fe augmentent significativement avec les doses de lessivage, et que 89 % ( $R^2=0.89$ ) de l'augmentation des quantités en Fe, est expliqué par l'augmentation des doses de lessivage .

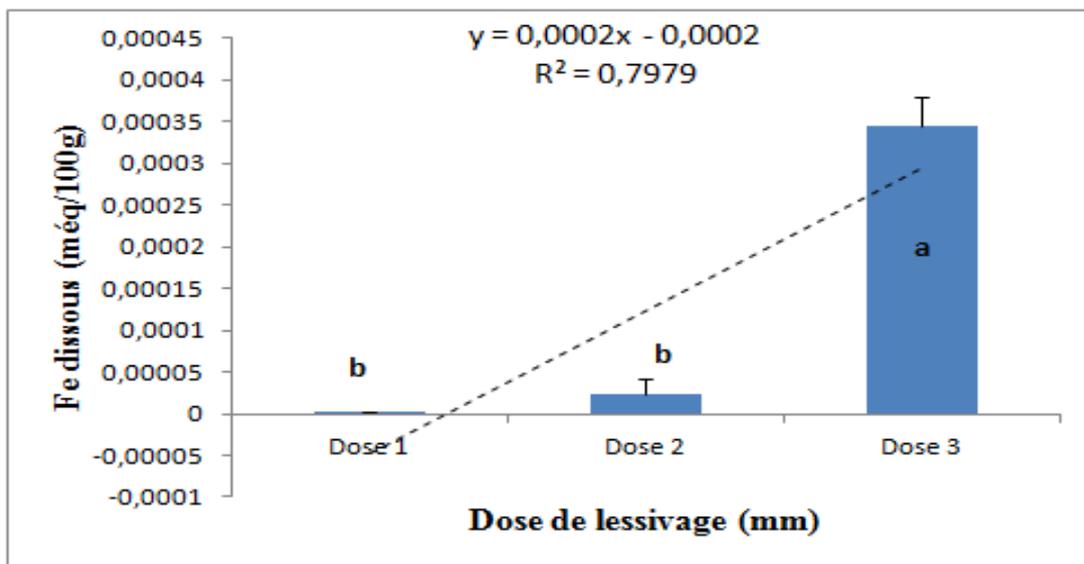


Figure 31 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Fe selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

Concernant le Zinc, on a enregistré des quantités très faibles par rapport à la quantité du sol en fer, d'autre part on a remarqué une augmentation significative des pertes en cet élément avec les doses de lessivage. En effet 84% de cette augmentation est justifié par les doses de lessivage. Les quantités lixiviées en Zn représentent  $7,67.10^{-6}$  méq/100g,  $1,108.10^{-5}$  et  $3,4163.10^{-5}$  méq/100g sous l'apport des doses de 35 mm, 70mm et 140 mm.( figure 32) dans le même sens Drissi,(2016) a souligné que le zinc est un élément trace immobile qui n'est pas exposé au risque de lessivage .

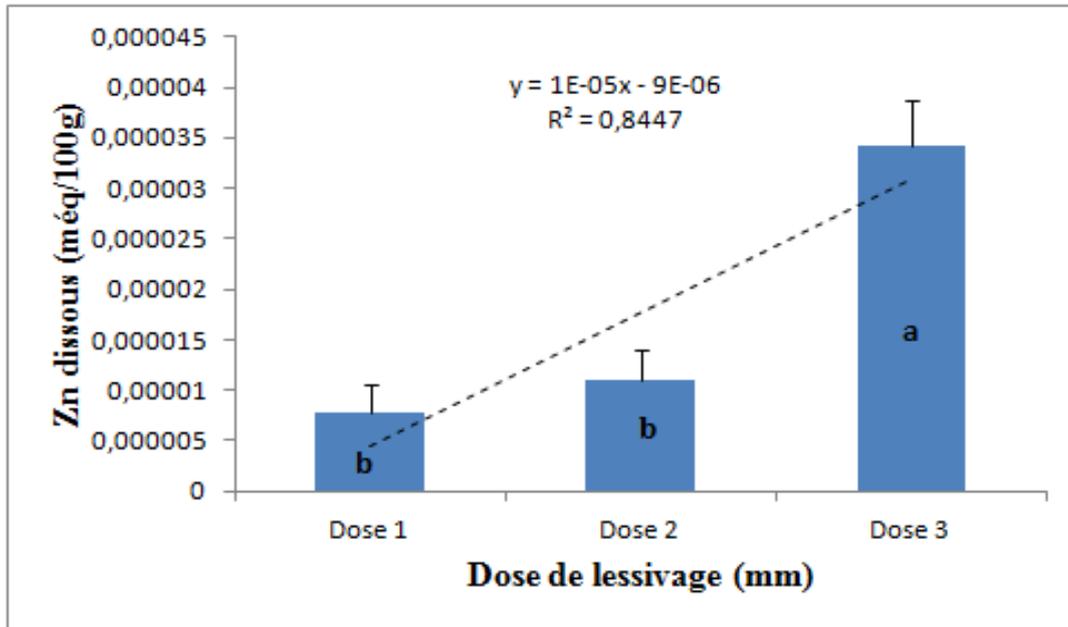


Figure 32 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Zn selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

Ces résultats ont montré que le Fe, Mn, Zn et le Cu ne sont pas considérés sensibles au lessivage dans le sol argileux. Alors le B a montré un risque de lessivage très élevé.

## 2. Pertes du profil de sol (0-30 cm) des autres éléments selon les doses de lessivage

Pour les autres éléments, l'analyse du lixiviat a montré la présence des cations du calcium en quantité très importante et qui varie selon la dose de lessivage appliqué, dont les quantités lessivé du calcium selon la dose de lessivage sont respectivement 0,0123méq/100g, 0,0212méq/100g , et 0,04méq/100g ces quantité peuvent être expliqué par la haute teneur en calcium au niveau du sol étudié (figure 33) . Le même constat est dressé pour le P, Na, Mg, K.

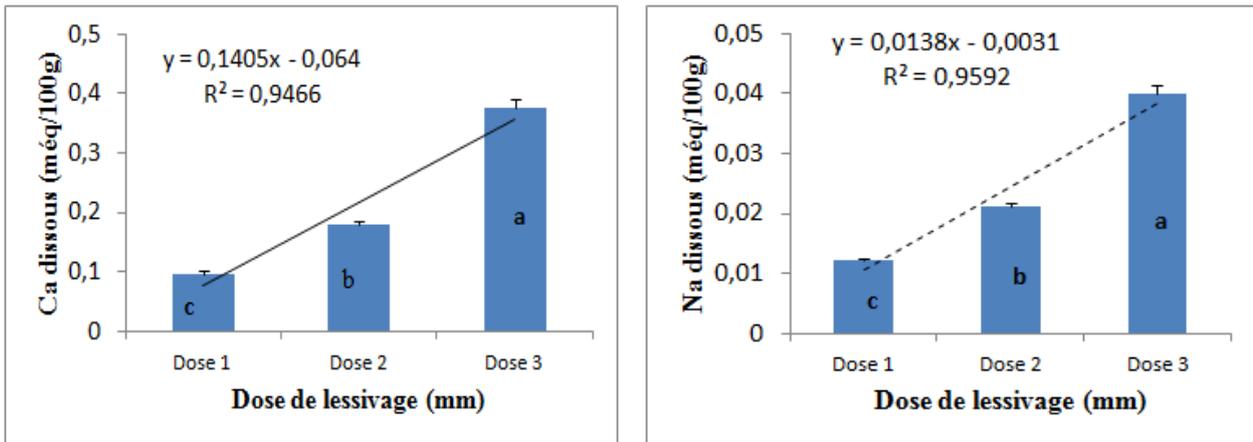


Figure 33 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en Ca , et en Na selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

Les analyses de variance ont montré un effet significatif de la dose sur le lessivage de Na,Ca,K,P, et Mg, en effet la comparaison des moyennes ,par le test S-N-K a montré que les quantités issus après Dose 3 (140mm), ont la quantité la plus importante , suivi par ceux issus après la dose 2 (70mm) , et en dernier ceux obtenus après l’application de la premier dose (35mm) ( figure 34).

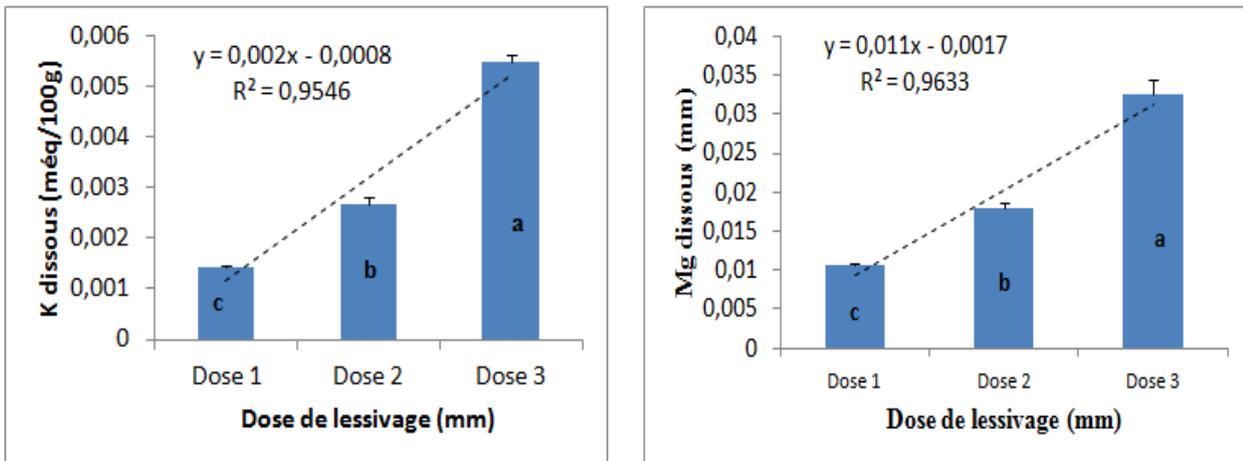


Figure 34 : Pertes du profil de sol (0-30 cm) en K, et en Mg selon les doses de lessivage

\*Dose1=35mm, Dose2=70mm, Dose3 =140mm

### 3. Distribution des oligo-éléments au niveau du profil du sol (0-30cm)

L’analyse statistique a montré après l’étude de la variance que la distribution du bore au niveau des différents horizons n’été pas influencé par les doses de lessivage, ce comportement de bore suggère que le bore été fixé au niveau du sol, cela peut être lié aussi au caractéristique physico-chimique du sol, d’après ( Saur, 1989) , a pH élevé le bore reste fixé au niveau du sol .

Le sol étudié est très riche en calcium ce qui se peut être responsable sur le blocage du bore, en effet Loué, 1993 a rapporté que la teneur élevée en Calcium réduit la biodisponibilité du bore dans le sol.

**Tableau 30 : Répartition du bore dans le sol après lessivage**

| Horizon                         | Dose de Lessivage |                  |                  |
|---------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                                 | 35mm              | 70mm             | 140mm            |
| <b>B échangeable ( mg/100g)</b> |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                | 0,0497±0,0042Aa   | 0,03675±0,0043Aa | 0,03425±0,0060Aa |
| <b>Horizon 2</b>                | 0,0217±0,0028Aa   | 0,02375±0,0043Aa | 0,0217±0,0005Aa  |
| <b>Horizon 3</b>                | 0,0257±0,0019Aa   | 0,032±0,0072Aa   | 0,0267±0,0024Aa  |

*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a : Horizon ; A : Dose*

La distribution du manganèse n'été pas influencé par la dose de lessivage appliqué en effet les résultats montre que les quantités du manganèse dans le profil du sol n'est pas différent tableau (31) mais il y a une différence significatif entre les horizons ce qui montre que le manganèse est mobile dans le profil du sol.

Les résultats suggère que la diminution de la biodisponibilité de cet élément peut être résultat de l'apport du fer en parallèle, Loué, 1993 a signalé que le manganèse échangeable dans le sol peut subir une diminution dans les sols riche en fer ou bien a la suite d'une fertilisation ferrique, le manganèse échangeable et aussi sensible au pH >6 ce dernier le rend immobile et indisponible dans le sol.

**Tableau 31 : Répartition du Mn dans le sol après lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                  |                 |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm             | 140mm           |
| <b>Mn échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                  |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,1225±0,0473Aa   | 0,2285±0,0466Aa  | 0,1713±0,0365Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,1119±0,01774Ab  | 0,2221±0,0567Aab | 0,2794±0,0345Ab |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,1587±0,0203Aa   | 0,1436±0,0258Aa  | 0,3038±0,0212Aa |

*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

Pour le cuivre pour mettre en exergue l'effet de la dose de lessivage sur le comportement du cuivre une analyse de la variance a été réalisée , et a montré que la dose (70mm) a un effet significatif sur la mobilité du cuivre, les teneurs en cuivre dans le premier horizon est supérieur que celles au niveau des deux derniers horizons, en effet le cuivre a resté bloqué au niveau du premier horizon (0-10cm) (tableau 32) .La richesse du sol en phosphore peut être responsable sur ce comportement loué,(1993)D'un autre les résultats ont montré que la teneur en cuivre échangeable dans l'essai du mélange est plus importante que celle du cuivre seul, ce résultats ce coïncide avec celui de Jean Dejou et al .,(1985) qui ont rapporté que entre le cuivre et le zinc une relation de synergie , et que une fois que la fertilisation cuprique et apporté en mélange avec le zinc la biodisponibilité du cuivre dans le sol augmente

**Tableau 32 : Répartition dans le sol du cuivre selon les doses de lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                 |                 |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>Cu échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,005±0,0003Ab    | 0,0065±0,0002Aa | 0,0063±0,0003Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,0038±0,0004Ab   | 0,0055±0,0004Ba | 0,0064±0,0003Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,0038±0,0002Aa   | 0,0046±0,0002Ca | 0,0055±0,0008Aa |

*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose*

Pour le zinc, les analyses statistiques ont révélé un effet significatif de la dose sur la répartition du zinc dans le sol, en effet le zinc reste fixé au niveau du profil du sol (0-10cm) (tableau33). Ces résultats coïncident avec ceux rapporté par Drissi,(2016) , qui a signalé que le zinc reste fixé au niveau de la couche supérieur (0-10cm) du sol .

**Tableau 33 : Distribution di zinc dans le sol selon les doses de lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                 |                 |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>Zn échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,0235±0,0022Aa   | 0,0222±0,0009Aa | 0,0194±0,0015Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,0039±0,0013Ba   | 0,0043±0,0005Ba | 0,0050±0,0021Ba |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,0031±0,0006Ba   | 0,0022±0,0001Ba | 0,0022±0,0002Ba |

*\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard*

Pour le fer ,les résultats de l'effet de la dose de lessivage sur la repartition et le comportement du fer sont présenté dans le tableau(34), l'analyse de la variance n'a pas montré d'effet significatif de la dose de lessivage sur la répartition du fer au niveau du profil du sol , cependant la teneur importante du fer reste au niveau de la couche (0-10cm),

**Tableau 34 : Répartition du fer dans le sol selon les doses de lessivage**

| Horizon                            | Dose de Lessivage |                 |                 |
|------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                    | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>Fer échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                   | 0,0328±0,0037Aa   | 0,0621±0,0143Aa | 0,0574±0,0164Aa |
| <b>Horizon 2</b>                   | 0,0403±0,0030Aa   | 0,0599±0,0160Aa | 0,0801±0,0160Aa |
| <b>Horizon 3</b>                   | 0,0377±0,0013Aa   | 0,0386±0,0020Aa | 0,0852±0,0181Aa |

*\* valeurs sous forme de moyenne± erreur standard*

*\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose*

Toujours La supposition que l'excès du phosphore est responsable sur ce comportement, loué,(1993), Alors que E Saur,(1989), a signalé que les principaux facteur intervenant dans la solubilité du zinc sont le pH élevé, La complexation avec la matière organique , la fixation sur les argiles.

On peut conclure que lors de l'établissement du plan de fertilisation, il faut tenir en compte que la mobilité des cinq oligoéléments suit l'ordre suivant : B > Mn>Fe>Cu>Zn, et que ces cinq élément sont influencé par les différents caractéristique du sol.

#### **4. Distribution des autres éléments dans le sol après le lessivage**

Quant au lessivage des cations suivant (Ca, P, Mg, et K), les analyses de la variance ont révélé que l'effet de la dose de lessivage n'est pas significatif sur la répartition de ces éléments au niveau du profil du sol (0-30cm) (tableau 35), alors que pour le Na, la dose a un effet significatif sur la mobilité de ce dernier.

**Tableau 35 : Répartition du Mg, K et P selon les doses de lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                 |                 |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                   | 35mm              | 70mm            | 140mm           |
| <b>Mg échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 2,4466±0,0365Aa   | 2,7022±0,0918Aa | 2,7990±0,1237Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 2,5508±0,0863Aa   | 2,9218±0,0908Aa | 2,7059±0,1398Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 2,5421±0,0324Aa   | 2,7307±0,0580Aa | 2,7791±0,1125Aa |
| <b>K échangeable ( méq/100g)</b>  |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 1,1414±0,0098Aa   | 1,2040±0,0364Aa | 1,2263±0,0740Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 1,2056±0,0558Aa   | 1,3081±0,0302Aa | 1,1419±0,0501Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 1,1674±0,0145Aa   | 1,2088±0,0224Aa | 1,1493±0,0499Aa |
| <b>P échangeable ( méq/100g)</b>  |                   |                 |                 |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,0778±0,0029Aa   | 0,0813±0,0023Aa | 0,0824±0,0067Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,0873±0,0039Aa   | 0,0845±0,0038Aa | 0,0729±0,0060Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,0806±0,0025Aa   | 0,0838±0,0015Aa | 0,0827±0,0026Aa |

\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard

\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose

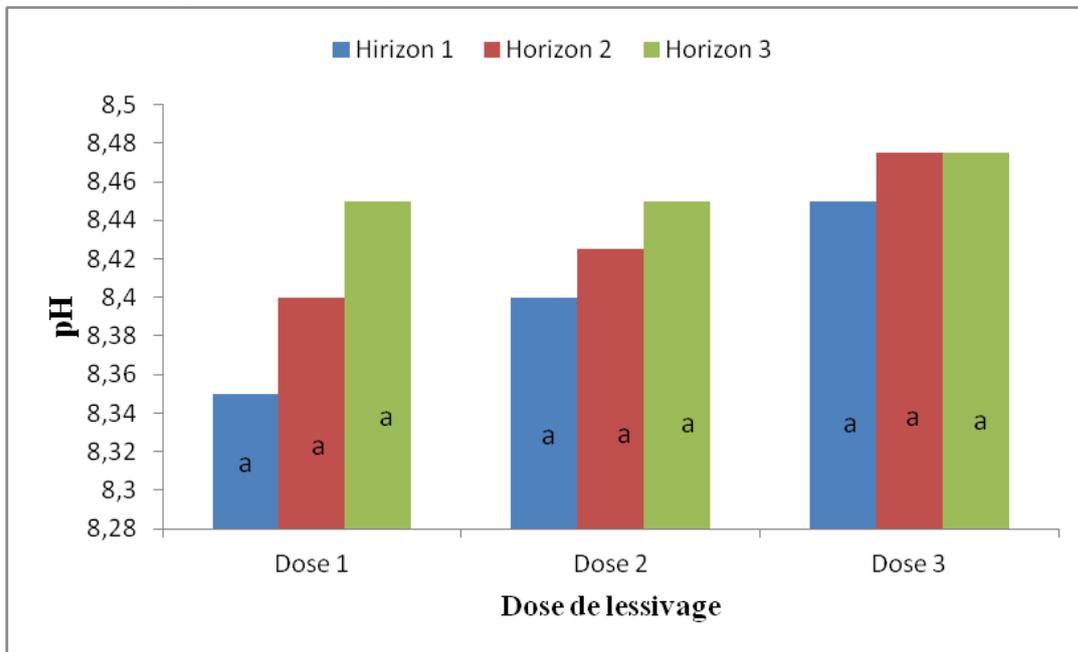
**Tableau 36 : Répartition du Na et Ca selon les doses de lessivage**

| Horizon                           | Dose de Lessivage |                  |                  |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                                   | 35mm              | 70mm             | 140mm            |
| <b>Ca échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                  | 41,0968±1,3562Ab  | 57,5361±7,1218Aa | 64,7761±2,9822Aa |
| <b>Horizon 2</b>                  | 41,8726±2,7989Aa  | 57,7938±6,5953Aa | 61,5159±2,3757Aa |
| <b>Horizon 3</b>                  | 40,1435±1,4864Aa  | 61,4455±1,6904Aa | 62,3220±1,0687Aa |
| <b>Na échangeable ( méq/100g)</b> |                   |                  |                  |
| <b>Horizon 1</b>                  | 0,1541±0,0071Aa   | 0,1678±0,0062Aa  | 0,1299±0,0160Aa  |
| <b>Horizon 2</b>                  | 0,2187±0,0320Ab   | 0,1848±0,0112Ba  | 0,1598±0,0202Aba |
| <b>Horizon 3</b>                  | 0,1864±0,0071Ab   | 0,2155±0,0139Ba  | 0,1985±0,0110Ba  |

\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard

\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. a: Horizon ; A : Dose

**5. Effet de l'apport du mélange (Zn, Cu, Mn, Fe, et B) sur le pH du sol**



**Figure 35 : Variation du pH selon les doses de lessivage et selon l'apport des oligo-éléments**

L'analyse statistique n'a révélé aucun effet significatif entre les doses de lessivage et l'apport des oligo-éléments sur la valeur du pH, pourtant on a remarqué une tendance que l'apport des cations

libère en avantage le  $H^+$ , en plus de l'apport de  $H_2O$  qui libère le  $H^+$  et donc avec la présence des protons  $H^+$  dans le milieu le pH du sol diminue. En effet Jinghua et al.,(2011) ont révélé que l'adsorption d'une mole de  $Cu^{2+}$  a entraîné la libération de 1,1-2,6 mole de proton ( $H^+$ ), en fonction des propriétés du sol en tant que contenu de minéraux et d'oxydes d'argile et sur l'adsorption de  $Cu^{2+}$  +mécanismes.

## II. Lessivage des oligo-éléments (Fe, Cu, Mn, Zn et B) dans les lysimètres au niveau du sol argileux

### 1. Effet de l'irrigation et des conditions climatique sur la distribution du mélange (Cu, Zn, B, Mn, et Fe)

La comparaison des moyennes, par le test de S-N-K au seuil de 5%, a permis de montré qu'il n y a aucune différence significatif entre les traitements (tableau 37).

**Tableau 37 : Répartition des différents oligo-éléments apporté**

| Horizon                            | Traitement      |                |
|------------------------------------|-----------------|----------------|
|                                    | Traitement 1    | Traitement 2   |
| <b>Zn Echangeable ( méq /100g)</b> |                 |                |
| Horizon 1                          | 0,0022±0,0002A  | 0,0024±0,0004A |
| Horizon 2                          | ----            | 0,0011±0,0001A |
| <b>Cu Echangeable ( méq /100g)</b> |                 |                |
| Horizon 1                          | 0,0022±0,0002A  | 0,0023±0,0004A |
| Horizon 2                          | ---             | 0,0011±0,0001  |
| <b>Fe Echangeable ( méq /100g)</b> |                 |                |
| Horizon 1                          | 0,01812±0,0014A | 0,0166±0,0019A |
| Horizon 2                          | ---             | 0,0174±0,0037A |
| <b>Mn Echangeable ( méq /100g)</b> |                 |                |
| Horizon 1                          | 0,0594±0,0032A  | 0,0622±0,0071A |
| Horizon 2                          | ---             | 0,0287±0,0011A |
| <b>B Echangeable ( mg/100g)</b>    |                 |                |
| Horizon 1                          | 0,0357±0,0084A  | 0,0387±0,0060A |
| Horizon 2                          | ---             | 0,0355±0,0165A |

\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard

\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes.

Pour le zinc la teneur au niveau du premier horizon est importante (0.0024mécq/100g) par rapport au deuxième (0.0011mécq/100g) ce qui montre qu'il ya une accumulation de cette éléments dans la couche superficielle, mais la différence reste n'est pas significatif statistiquement, pour le cuivre les résultats ont révélé la même tendance et que cette élément reste fixé au niveau du premier horizon, d'un autre part les teneurs en bore dans les deux horizons au niveau du traitement 2 sont proche m'une a l'autre ce qui montre que le bore est mobile mais toujours en absence du différence significatif entre les traitements. Ces résultats suggère que les caractéristique physico-chimique du sol ont influencé sur la distribution de ces éléments chimique, En effet (Lal et Taylor, 1970) ont rapporté que la richesse du sol en matière organique diminue la biodisponibilité des éléments chimique .

## 2. Effet de l'irrigation et des conditions climatique sur la distribution des autres éléments

Une analyse de variance a été réalisée pour chaque traitement et chaque horizon. Les résultats ont montré que l'irrigation et les conditions climatiques n'ont pas d'effet significatif sur la distribution du Mg, Na, Ca, K, et P (Tableau 38).

**Tableau 38 : Distribution du Mg, Ca, Na, K, et P**

| Horizon                            | Traitement      |                 |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|
|                                    | Traitement 1    | Traitement 2    |
| <b>Mg Echangeable ( méq /100g)</b> |                 |                 |
| Horizon 1                          | 4,8833±0,2970 A | 4,8411±0,0650 A |
| Horizon 2                          | ---             | 3,7071±0,0875 A |
| <b>K Echangeable ( méq /100g)</b>  |                 |                 |
| Horizon 1                          | 1,5683±0,1375 A | 1,6131±0,1782 A |
| Horizon 2                          | ---             | 0,6476±0,0137 A |
| <b>P Echangeable (méq /100g)</b>   |                 |                 |
| Horizon 1                          | 0,0825±0,0111A  | 0,0774±0,0103A  |
| Horizon 2                          | ---             | 0,1390±0,0881   |
| <b>Na Echangeable ( méq /100g)</b> |                 |                 |
| Horizon 1                          | 0,8789±0,0428A  | 0,8426±0,0326A  |
| Horizon 2                          | ---             | 0,8216±0,0309A  |
| <b>Ca Echangeable (méq /100g)</b>  |                 |                 |
| Horizon 1                          | 34,2973±0,0471A | 34,1350±0,4955A |
| Horizon 2                          | ---             | 33,9049±1,0170  |

\* valeurs sous forme de moyenne ± erreur standard

\*Au niveau de chaque ligne ou chaque colonne, les moyennes suivies des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

---

## Conclusion

L'objectif de cette étude a été comprendre et d'évaluer la mobilité et le risque de lessivage de cinq oligoéléments ; Mn, Cu, Fe, Zn et B dans le sol argileux-calcaire de SEFROU, cette évaluation a été au niveau de deux expérimentations : suivi dans les colonnes en PVC, et suivi dans les lysimètres.

Pour ce faire, la première expérience a été menée dans des colonnes en polyéthylène (PVC) remplies à 30 cm de profondeur. Un apport de 1.2, 5, 0.6, 0.6, 5 mg.kg<sup>-1</sup> de Fe, Mn, Cu, B, et Zn respectivement, est appliqué à la surface du sol argileux-calcaire. Trois quantités de lessivage ont été testées: 35 mm, 70 mm et 140 mm. Pour l'étude dans les lysimètres, un apport des cinq éléments a la surface du sol, avec les mêmes teneurs que dans les colonnes a été mise en évidence et soumis une irrigation de 20 mm, en plus des conditions climatiques naturelles (424 mm de pluie).

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus montre que le B est mobile dont une quantité importante a été trouvée dans le lixiviat. D'autre part Les analyses minérales de la solution montrent que le Zn est non mobile sur le type de sol argileux-calcaire, dont des quantités négligeables de cet élément ont été trouvées dans le lixiviat, et se trouvent accumulés au niveau du premier horizon du sol. Pour le Cu, sa mobilité est considérée faible dont la plus haute concentration a été enregistrée au niveau du 1<sup>er</sup> horizon pour toutes les doses apportées, la quantité de cuivre retenue par le sol est beaucoup plus élevée que celle trouvée dans la solution drainée, le Fe et le Mn est considéré peu mobile que le bore.

Les résultats obtenus dans les lysimètres montrent que l'ensemble des oligo-éléments apportés se trouvent fixés au niveau de la surface pour les deux traitements (30 cm et 60 cm). alors que l'analyse de la solution drainée et encore en cours d'exécution.

Dans ce sens, les résultats confirment ceux que l'on a pu trouver dans la littérature, c'est-à-dire que le bore est plus mobile que le Zn, Fe, Cu, Mn. D'un autre part l'évaluation verticale des teneurs de ces éléments au niveau du profil du sol montre que ceux-ci sont plus abondants dans les couches superficielles.

En général on a remarqué des effets négatifs du pH élevé, des teneurs en argiles, du calcaire actif, et de CEC élevée sur la biodisponibilité des oligo-éléments Fe, Mn, Zn, B et Cu échangeables.

## Recommandations

À la lumière des résultats obtenus à travers cette étude, nous pouvons tirer les recommandations suivantes :

- ❖ Refaire l'expérimentation de lessivage au niveau du sol argileux.
- ❖ Etudier la mobilité du Fe, Mn, Zn séparément dans le sol argileux.
- ❖ Adopter l'expérience des colonnes à d'autres types du sol de différentes régions agricoles du Maroc.
- ❖ Tenir en compte la sensibilité au lessivage du B, au niveau du sol argileux, lors de l'établissement des plans de fertilisations des cultures.
- ❖ Ne pas prendre en considération le lessivage du Cu, Fe, Zn, Mn au niveau du sol argileux lors de l'établissement des plans de fertilisation.
- ❖  Reprendre es essais les lysimètres sur plusieurs années dans d'autres régions agricoles du Maroc, pour voir l'impact des différentes conditions climatiques sur la mobilité des oligo-éléments.
- ❖ Reprendre l'essai du lysimètre au niveau du domaine Louata dans une parcelle non irrigué qui soumis juste les conditions climatique naturelle.
- ❖ Penser aux apports foliaires pour le Mn, Zn, et Cu pour minimiser les teneurs non échangeable de ces éléments au niveau du sol, pour garantir l'assainissement des sols cultivés.
- ❖ Penser aux apports foliaires pour le bore pour minimiser les pertes en lessivage.
- ❖ Apporté le Fer sous forme chélate lors de la fertilisation

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

**Adriano DC., 1986.** Trace elements in the terrestrial environment. New York: Springer-Verlag.

**AGBENIN J.O. et OLOJO L.A. 2004.** Competitive adsorption of copper and zinc by Bt horizon of a savanna Alfisol as affected by pH and selective removal of hydrous oxides and organic matter. *Geoderma*, Vol. 119, pp. 85-95.

**Alloway B. J., 2008.** Zinc in Soils and Crop Nutrition. 2 edn. International Zinc Association And International Fertilizer Industry Association, Brussel, Belgium and Paris, France  
**Alloway, B. J., 1995.** Heavy metals in soils. Springer, 368 pp.

**ALLOWAY. , 1992** Heavy metals in soils. Glasgow : Blackie, 339 p

**Alloway, B.J., 1990.** Heavy metals in soils. London: Blackie Academic & Profesional. 1990. ISBN 0-751-40198-6, 368 p.

**ALLAWAY W.H. (1968)** – Agronomic controls over the environmental cycling of trace elements. *Adv. Agron.*, Vol. 120, pp. 257-274.

**Colinet Gilles., Jean Laroche ., Marie Etienne ., Daniel Lacroix ., Laurent Bock .2004** Intérêt d'une stratification pédologique pour la constitution de référentiels régionaux sur les teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de Wallonie

**Cornu S. et Clozel B., 2000.** Extractions séquentielles et spéciation des éléments traces métalliques dans les sols naturels. *Analyse critique. Étude et Gestion des Sols*, 3, pp. 179-189.

**Coic Y. et Cooppenet M., 1989.** Les oligo-éléments en agriculture et élevage, Edit. Quae INRA Paris, 122p.

**Baize D., Sterckeman T., Piquet A., Ciesielski H., Beraud J., Bispo A., 2005.** Dérogations relatives à la réglementation des boues de stations d'épuration. Guide technique. 142 p.

**Baize D., 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris, 410

**Bradl, H.B., 2004.** Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents; J. Colloid Interface Sci., 277, 1–18.

**Brady, N.C.; Weil, R.R., 1990.** The Nature and Properties of Soils, 10th edn; Macmillan, New York.

**Blanchard, C., 2000.** Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Thèse de Doctorat en Chimie, Université de Lyon, pp. 241

**Bourrelier, P.H., Berthelin, J. 1998.** Contamination des sols par les éléments en traces : Les risques et leur gestion. in: Techniques et documentation, Vol. 42 de Rapport de l'Académie des sciences, Académie des Sciences Paris, France, pp. 440.

**Bingham. F.T., 1982.** Boron Methods of Soil Analysis. Part II, 2nd ed. Agron. Monogr. 9, Madison, WI: Soil Science Society of America, , pp. 501–538.

**Dekki .,N.2012.** Formes et distribution des oligo-éléments dans les sols sales du Bas-Cheliff, p 27

**DAP.Direction Provinciale de l’Agriculture de sefrou 2016.**

**DAP.Direction Provinciale de l’Agriculture de sefrou 2013.**

**Drissi Saad., Abdelhadi Aït Houssa., Ahmed Bamouh., Ahmed Bouaziz., Mohamed Benbella.,2016.** zinc migration in the sandy soil and its impact on the bioavailability of some nutrient in the root environment

**Deschênes, L., R. Chassé, M. Giroux, C. Bastien , L. Jean, V. Bécaert, D. Martineau et G. Côté, G., 2006,** Développement d’une méthode d’évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d’un sol, PARDE, 147p

**Dubé, J.-S. 1997.** Application d’un protocole analytique à l’évaluation de la distribution géochimique des métaux lourds dans les sols contaminés. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec.

**DUCHAUFOR P. (1995)** - Pédologie. Sol, végétation, environnement. 4<sup>o</sup> édition, MASSON.

**E Saur 1990.**Mise au point bibliographique, au sujet de la nutrition oligo-min\_erale des plantes sup\_erieures. Carences et toxicit\_es chez les conif\_eres

**ER-REZZA Hamid.2017.**Etude de la mobilité de quatre oligoéléments (Fe, Mn, Cu et B) dans un sol sablonneux du Loukkos et un sol limono-argileux du Gharb

**Evans, L. J., 1989.** Chemistry of metal retention by soils, Environmental Science & Technology 23.

**Fageria, N.K., V.C. Baligar, and R.B. Clark., 2002.** Micronutrients in crop production. Adv. in Agron. 77:185-268.

**Förstner U., 1985.** Chemicals forms and reactivities of metals in sediments in "chemical methods for assessing bio-available metals in sludges and soil", Leschber R., Davis R.D., L'Hermite P., CEC, Elsevier Applied Science publishers, 1-30.

**Gounou.,c. 2008.** Mobilite des elements traces metalliques dans les Sediments : couplage et comparaison des approches Chimique et microbiologique

**GWRTAC (Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center). 1997.** Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater. Technology Evaluation Report. TE-97-01

**Goldberg S, Forster HS, Heick EL., 1993.** Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals and soils inferred from ionic strength effects. Soil Sci Soc Am J.;57:704-8.

**Giroux, M. M. Rompré, D. Carrier, P. Audesse et M. Lemieux., 1992.** Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. Agrosol, Vol. 5 (2) :46-55.

**Gupta U C 1979** Boron nutrition of crops. Adv. Agron. 31, 273–307. Hu H and Brown P H 1994 Localisation of boron in cell walls of squash and tobacco and its association with pectin. Evidence for a structural role of boron in the cell wall. Plant Physiol., 681–689p.

**Gupta SK, Aten C., 1993.** Comparison and evaluation of extraction media and their suitability in a simple model to predict the biological relevance of heavy metal concentrations in contaminated soils. Intern J Environ Anal Chem 51, 25-46.

**Gupta U.C., 1968.** Relationship of total and hot-water soluble boron, and fixation of added boron, to properties of podzol soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:45–48.

**Harmsen, J., 2007.** Measuring bioavailability: from a scientific approach to standard methods. *J Environ Qual*, 36(5), 1420-8.

**Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W.L. Nelson., 2005.** *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 8th edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 515 p.

**HLAVACKOVA.,Petra.2005** . Evaluation du comportement du cuivre et du zinc dans une matrice de type sol à l'aide de différentes methodologies

**HLAVACKOVA P., PARASCANU I., BARNA R. et FERNANDEZ A. 2005**Rôle de la tourbe dans la rétention de cuivre et de zinc dans un sol modèle : Effet du pH et modélisation.

**Hall, G. E. M., Vaive, J. E. and MacLaurin, A. I. (1996).** "Analytical aspects of the application of sodium pyrophosphate reagent in the specific extraction of the labile organic component of humus and soils." *Journal of Geochemical Exploration* 56: 23-36.

**Hatira A., Gallali T., Rouiller J., Guillet B., 1990.** Stabilité et solubilité des complexes formés entre le cuivre, le plomb, le zinc et les acides fulviques. *Science du Sol*. Vol. 28, pp. 125-135.

**Jinghua Fana, Zhenli Hea., Lena Q., Mab, Yuangen Yanga, Xiaoe Yanga,c, Peter J. Stoffella 2011.** Immobilization of copper in contaminated sandy soils using calcium water treatment residue p5

**Jenne, E.A., 1968.** Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and water: the significant role of hydrous Mn and Fe oxides; *Adv. Chem. Ser.*, 73, 337–387.

**Juste, C. 1988.** Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. *Science du sol*, 26(2), 103 – 112p.

**Juste c., 1983.** Problèmes posés par l'évaluation de la disponibilité pour la plante des éléments-traces du sol et de certains amendements organiques. *Sci. Sol*, na 2,109-122.

**Kyuma, et K. Paddy., 2004.** Soil Science Kyoto Press. P. 138.

**KEDZIOREK M.A.M., DUPUY A., BOURG A.C.M., COMPÈRE F, 1998.** Leaching of Cd and Pb from a polluted soil during the percolation of edta : laboratory column experiments. Modeled with non-equilibrium solubilization step. Environmental Science and Technology, Vol. 32, pp. 1609-1614.

**Kabata-pendias A., 2001.** Traces elements in soils and plants. CRC press LLC. 403p.

**KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H., 1984.** Trace elements in soils and plants. C.R.C.Press, Boca-Raton, Florida, 33431, 315 p.

**Kraustopf KB (1972)** Geochemistry of micronutrients. In : Micronutrients in Agriculture., 7-40 p

**LESPAGNOL.G. 2003.**Lixiviation du Chrome, du Cuivre et de l'Arsecenic (CCA) à partir de sols contaminés sur des sites de traitement du bois

**Loue A., 1993.** Les oligo-éléments en agriculture, SCPA. 577p.

**Loué A., 1986.** Les oligoéléments en agriculture. SCPA, 339 p.

**Lipman, C. B., et Mackinney, G. (1931).** "Proof of the essential nature of copper for higher green plants." Journal of Physiology, 6, 593-599.

**Lindsay W.L. et Norvell W.A., 1977.** Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal, Vol.42, N°3, pp. 421-428.

**MARCOS L. 2001,**Etude expérimentale et modélisation du transfert du zinc et du plomb dans des milieux sableux modèles. Thèse de doctorat. Nantes : Ecole des Mines de Nantes, 281 p.

**McBRIDE M.B. 1989,** Reactions controlling Heavy Metal Solubility on Soils. In : Stewart B.A., Advances in Soil Science. Vol. 10 New York : Springer-Verlag, pp. 1-56.

**MOREL R. 1996,**Les sols cultivés. 2e édition. Paris : Lavoisier, 389p.

**Pickering, W. F., 1986.** Metal ion speciation -- soils and sediments (a review). *Ore Geology Reviews*; 1: 83-146.

**Parent, L.O. et Rivest, R., 2003,** Les éléments nutritifs dans le Guide de fertilisation, 1ère édition. CRAAQ, Québec. 294pp.

**PITTER P. 1999,** Hydrochemie. Praha : VSCHT 3e édition, 568 p..

**Pickering, W. F., 1986.** Metal ion speciation -- soils and sediments (a review). *Ore Geology Reviews*; 1: 83-146.

**Ponnamperuma, F. N., 1972.** Chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24, 29–95.

**Quevauviller, P., Ure, A., Muntau, H. and Griepink, B. (1993).** "Improvement of analytical measurements within the BCR-programme : single and sequential extraction procedures applied to soil and sediment analysis." *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry* 51: 129-134.

**Reid, K. (2006).** "Carences en oligo-éléments dans le blé d'automne." <http://www.omafra.gov.on.ca> Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales, Toronto, Ontario Canada

**ROOSE E.J. 1968.** UN DISPOSITIF DE MESURE DU LESSIVAGE OBLIQUE DANS LES SOLS EN PLACE

**SCHRAMEL O., MICHLKE B., KETTRUP A. 2000,** Study of the copper distribution in

contaminated soils of hop fields by single and sequential extraction procedures. *The Science of*

*the total Environment*, Vol. 263, pp.11-22  
**SIGG L., STUMM W., BEHRA PH,1992.** Chimie des milieux aquatiques. Masson : Paris.567 p.,

**SARDIN M. 1997,**Modélisation des interactions solide-liquide en milieu poreux naturel. Application au transport transitoire de solutés. Stage CPIC « Méthodologie de la réhabilitation des sites pollués ». Nancy : CPIC - Groupe ENSIC, 122 p.

**Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996.** Aquatic chemistry. New York, 1022 pp

**SIGG L., STUMM W., BEHRA PH,1992.** Chimie des milieux aquatiques. Masson : Paris. 567 p.,

**Sposito G., 1989.** The chemistry of soils. Oxford University Press, New York. 277p.

**Stevenson, F.J., Humus Chemistry: Genesis., 1982.** Composition, Reactions; Wiley, NewYork.

**Sabine Goldberg 1997.** Reactions of boron with soils

**Singh, B. R. 1974a.** Migration of ions in soils I. movement of Zn65 from surface application of zinc sulphate in soil columns. Plant Soil 41: 619-628.

**Singh, B. R. 1974b.** Migration of ions in soils II. movement of Mn54 from surface application of manganese sulphate in soil columns. Plant Soil. 41: 629-636.

**Thomas Lenoir 2011.**Mécanismes de rétention du cuivre dans les sols : évaluation statistique des approches macroscopiques et spectroscopiques

**Tran, T.S., Giroux, M., Audesse, P. et Guilbault, J., 1995,** Importance des oligo-éléments en agriculture: symptômes visuels de carence, analyses des végétaux et des sols, Agrosol, Vo. 8 (1) :12-22.

**Tyler, G. et Zohlen, A., 1998,** Plants seeds as mineral nutrient resource for seedlings – A comparison of plants from calcareous and silicate soils, Annals of Botany 81: 445-45

**VÉDY J.Cl., CLÉMENT J.P., 1994.** Atteintes et protection qualitatives des sols Suisses. Étude et Gestion des Sols, Vol. 1, No-1, 35-43.

**XIAN X., SHOKOHIFARD G., 1989.** In Ross Sheila M., 1994, Toxic Metals in Soil- Plant Systems, Ed. Wiley, 134 p

**Y. et Cooppenet M., 1989.** Les oligo-éléments en agriculture et élevage, Edit. Quae INRA Paris, 122p

## ***Master Sciences et Techniques***

### ***Gestion et Conservation de la Biodiversité***

## ***Résumé***

**Nom et prénom : LYOUSFI Nadia**

**Année Universitaire : 2017-2018**

**Titre : Evaluation de la mobilité de quelques oligo-éléments (Mn,Zn,Cu,Fe, et B) dans le sol argileux-calcaire de Séfrou**

La réduction des effets secondaires des fertilisants sur l'environnement est un enjeu majeur du grenelle de l'environnement. L'utilisation prolongée des micro-éléments comme fertilisants a entraîné des perturbations au niveau du sol et de la nappe phréatique.

Nous avons cherché à évaluer l'effet des doses de lessivage sur la mobilité de cinq oligoéléments ; le Fer (Fe), le Cuivre (Cu), le Manganèse (Mn) et le Bore (B), le Zinc (Zn) appliqués comme engrais, au niveau du sol argileux-calcaire de la province de Séfrou.

Pour cela l'étude a été menée dans deux expérimentations ; la première au niveau des colonnes en PVC remplies à une hauteur de 30 cm. Un apport de 1.2 mg.kg-1 de Fe, 5 mg.kg-1 de Mn, 0.6 mg.kg-1 de Cu, et 0.5 mg.kg- 1 de B est appliqué à la surface du sol en tant que solution. Le Bore, le Cuivre ont été apporté séparément et puis en mélange avec le Zinc, le Fer, et le Manganèse. Nous avons exposé ces oligo-éléments à trois doses de lessivage 35mm, 70mm, et 140mm. Enfin nous avons évalué les pertes en lessivage de chaque élément. La deuxième expérimentation a été conduite dans des lysimètres au champ, les cinq oligo-éléments ont été apportés en mélange, puis exposé aux conditions climatique et l'irrigation, ensuite nous avons mesuré la distribution de chaque élément étudié au niveau du profil du sol dans les deux expérimentations. Le dispositif expérimental adopté est en blocs aléatoires complets avec quatre répétitions. Des analyses chimiques de lixiviat et du sol ont été effectués pour évaluer la mobilité de différents éléments minéraux après lessivage.

Les résultats ont montré que le B est mobile, dont une quantité importante a été trouvée dans le lixiviat. En revanche, le Cu, et le Zn ne sont pas mobile et se sont localisés au niveau du premier horizon (0-10 cm) pour toutes les doses de lessivage apportées, pour le Mn, et le Fe sont considérés moins mobiles que le bore. Pour l'expérimentation au niveau des lysimètres, le Cu, Fe, Zn et le Mn sont considérés moins mobiles dans le sol, pour les pertes en lessivage des oligo-éléments les résultats sont encore au cours de réalisation.

**Mots clés :** Oligo-éléments ; Cuivre ; Manganèse ; Fer ; Zinc ; Bore ; Lessivage ; Fertilisation ; Mobilité ; Sol argileux-calcaire ; Lysimètre.